

Análise preliminar do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis

Júlia Santos Schramm

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Júlia Santos Schramm

**ANÁLISE PRELIMINAR DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DO PROCESSO
DE INCINERAÇÃO COMO ALTERNATIVA NA GESTÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM FLORIANÓPOLIS**

Trabalho apresentado à
Universidade Federal de
Santa Catarina para
Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental

Orientador : Prof. Dr. Edson
Bazzo

FLORIANÓPOLIS, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**ANÁLISE PRELIMINAR DO POTENCIAL ENERGÉTICO E DO PROCESSO
DE INCINERAÇÃO COMO ALTERNATIVA NA GESTÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM FLORIANÓPOLIS**

JÚLIA SANTOS SCHRAMM

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Edson Bazzo
(Orientador)



Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior
(Membro da Banca)



Eng. Flávia Guimarães Orofino
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, 2015

*Aos meus pais, em nome da minha sorte em tê-los na vida.
Vocês são os grandes responsáveis pelas minhas vitórias.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela certeza que sempre tive de seu amor incondicional. Essa certeza fez frente em todas as decisões que tomei e nos obstáculos que enfrentei, trazendo-me a força e a segurança que só se tem quando se sente verdadeiramente amado. Obrigada. Por tanto carinho, tanta doação, por serem o melhor exemplo que eu poderia ter tido. Agradeço a força que depositaram em mim quando, apesar do medo, apostaram nos meus sonhos e não mediram esforços para tornarem possíveis as vezes em que precisei voar um pouquinho mais longe. À minha irmã Fernanda, que me contagia diariamente com a espontaneidade e a transparência dos seus sentimentos. Por ser companheira e amiga em todos os momentos, e tanto ter me ensinado com as nossas diferenças e seu jeito dedicado de ser.

À minha família, sempre tão unida, que nessa união me ensinou a força e a importância de termos uns aos outros. Estar com vocês é sinônimo de renovação de alma e a certeza de tempo bom. Em especial aos meus avós, pela simplicidade de seu amor sem medidas e por todo o carinho que me dão, por se fazerem presentes em todos os momentos da minha vida. Nada faria sentido sem vocês.

Ao meu namorado André, por caminhar ao meu lado durante todos esses anos, me ajudando a descobrir quem sou e despertando o que existe de melhor em mim. Agradeço pelos conselhos, por sempre me inspirar a buscar todo o meu potencial e pelo seu jeito único de me fazer sorrir.

Às minhas amigas que estão do meu lado há tanto tempo, Roberta, Júlia e Gabriela, que me mostraram que a amizade verdadeira supera as distâncias e as diferenças que a vida nos impõe quando crescemos juntas e escolhemos seguir caminhos diferentes. Por terem permanecido perto, ainda que nem sempre fisicamente, mas por sempre estarem presentes.

Aos amigos e amigas que encontrei na faculdade, principalmente à Gabriela Vandri, Rita, Thauana e Gabriela Silva, obrigada pelo companheirismo de todos os dias, por terem tornado esses anos de graduação os mais leves e bonitos possíveis. A amizade que construímos é algo que levarei comigo para sempre.

Ao meu orientador, Professor Edson Bazzo, pela confiança e liberdade depositada nas minhas palavras, e por todo o conhecimento compartilhado, a atenção e orientação durante este trabalho.

A todos os outros amigos que tive a sorte de encontrar nessa caminhada, minha eterna gratidão.

“When we have difficulty imagining a change, we mistakenly conclude it's unlikely to happen.” (Zack Kanter, 2015).

RESUMO

SCHRAMM, Júlia Santos. **Análise preliminar do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis.** 2015. 86 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e a problemática de sua destinação final é assunto recorrente e cada vez mais preocupante em escala global. Na realidade brasileira, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, surge como o primeiro grande passo para a melhoria da gestão dos resíduos sólidos no país, instituindo, entre suas diretrizes, a destinação final como última medida a ser adotada para o resíduo, prática que não é observada no contexto atual do país. O presente trabalho tem como principal objetivo estimar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis, definidos aqui como os resíduos domiciliares, de forma a avaliar a viabilidade de aplicação da técnica de aproveitamento energético desses, conhecida por incineração, como alternativa de tratamento anterior à disposição final em aterros sanitários no município. Essa alternativa propõe a possibilidade de redução do volume a ser destinado aos aterros sanitários paralelamente à reciclagem do resíduo como insumo para geração de energia. O trabalho dará ênfase à análise do potencial energético dos resíduos produzidos na cidade, a partir do levantamento de dados acerca da caracterização dos tipos e quantidades de resíduos produzidos, diferenciando-os entre resíduos com potenciais combustíveis e recicláveis e propondo o tratamento de incineração apenas àqueles que não possuam grande potencial de reciclagem.

Palavras-chave: Potencial energético; incineração; resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

SCHRAMM, Júlia Santos. **Preliminary review of the energy potential and the incineration process as an alternative in urban solid waste management in Florianópolis.** 2015. 86 pages. Completion of Course Work (Sanitary and Environmental Engineer Degree). Federal University of Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

The municipal solid waste management and the problem of its final disposal is a recurring issue and an increasing concern in global scale. In Brazil, the National Policy of Solid Waste, established by the Law nº 12.305/2010, appears as the first major step towards the improvement of solid waste management in the country, establishing, among its guidelines, the final disposal as the last measure to be applied in waste management, a practice that is not seen in the present context of the country. This study aims to estimate the energy potential of the municipal solid waste in the city of Florianópolis, defined here as the household waste, in order to assess the feasibility of implementing the technique of energetic use known by incineration as a treatment alternative prior to final disposal in landfill in the city. This alternative offers the possibility of minimizing the volume to be disposed in landfills at the same time as the recycling of waste, as it serves as an input for power generation. The work will be focused in the analysis of the energy potential of the waste generated in the city, based on a data survey of the characterization of types and quantities of waste generated, separating them between recyclable waste and potential fuel and proposing the incineration technique only to those that do not have a great potential for recycling.

Keywords: Energy potential; incineration; municipal solid waste.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Processos físico-químicos utilizados no tratamento dos gases de combustão de um incinerador de RSU.....	46
Quadro 2 - Benefícios e Desvantagens da Incineração em relação aos Aterros Sanitários	51

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Hierarquia da gestão dos resíduos sólidos urbanos	18
Figura 2 - Geração de RSU (t/ano)	24
Figura 3 - Destinação final de RSU (t/dia).....	25
Figura 4 - Formas de Tratamento de Resíduos Sólidos em Países Europeus.....	29
Figura 5 - Planta típica de incinerador com grelhas móveis	38
Figura 6 – Esquema de incinerador de leito fluidizado circulante	39
Figura 7 – Esquema de um Ciclo de Rankine	44
Figura 8 – Emissões de um incinerador	45
Figura 8 - Distribuição das fontes controladas de emissão de dioxinas nos EUA, 2012	53
Figura 10 - Composição Gravimétrica dos RSU de Florianópolis em 2002.....	62
Figura 11 - Composição Gravimétrica Preliminar dos RSU de Florianópolis em 2014.....	63
Figura 12 - Fluxograma proposto para a gestão dos RSU.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Risco de câncer a partir de diferentes exposições	54
Tabela 2 – Seleção dos RSU que servirão de combustível	65
Tabela 3 – Umidade presente nos componentes dos RSU	67
Tabela 4 – PCI dos componentes de RSU (base seca)	68
Tabela 5 – Transformação dos RSU: Base Úmida para Base Seca.....	69
Tabela 6 – Estimativa do PCI equivalente dos RSU de Florianópolis ..	69
Tabela 7 - Estimativa do potencial energético dos RSU de Florianópolis	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;
ACMR – Associação de Catadores de Materiais Recicláveis;
ACV – Análise de Ciclo de Vida;
CDR – Combustível Derivado de Resíduo;
COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital;
GEE – Gases de Efeito Estufa;
PCI – Poder Calorífico Inferior;
PCS – Poder Calorífico Superior;
PGRS – Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos;
PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos;
PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente;
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos;
WTE – Waste-to-Energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivos Específicos	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	23
2.2	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos	25
2.3	Alternativas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos 27	
2.3.1	Reciclagem	29
2.3.2	Compostagem	31
2.3.3	Digestão Anaeróbia	32
2.3.4	Aterro Sanitário	33
2.3.5	Incineração	35
2.4	O Processo de Incineração.....	36
2.4.1	Histórico da Incineração.....	40
2.4.2	Descrição Técnica de um Incinerador	42
2.5	Efluentes da Incineração e Técnicas de Tratamento	44
2.5.1	Emissões Atmosféricas.....	46
2.5.2	Efluentes sólidos e líquidos	49
2.6	Aspectos Positivos e Negativos do Processo de Incineração 49	
2.7	Recuperação Energética de RSU através da Incineração	56
3	METODOLOGIA.....	59
3.1	Panorama dos RSU em Florianópolis.....	60
3.1.1	Composição Gravimétrica dos RSU em Florianópolis...	61
3.2	Tratamento dos dados	63
3.3	Cálculos Energéticos	66
3.3.1	Teor de Umidade	66
3.3.2	Poder Calorífico Inferior	67
3.3.3	Estimativa do potencial energético.....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1	Resultados	72
4.2	Considerações Finais.....	75
4.3	Recomendações Futuras	76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICE A – Planilha de cálculos	85
ANEXO A - Composição detalhada de RSU – Peso por material coletado em Florianópolis (PMF, 2014)	86

1 INTRODUÇÃO

Apesar da crescente conscientização populacional em relação à importância que deve ser dada à geração e destinação adequada do lixo, não é raro deparar-se com a errônea percepção do lixo como um material descartável, mero subproduto do sistema produtivo e um estorvo para a sociedade de consumo. Calderoni (1997) demonstra essa percepção ao afirmar que o lixo é um material mal amado: todos o produzem, inevitavelmente, todos os dias, porém dele desejam se livrar o mais rápido possível. Scliar (1999), por sua vez, nos apresenta a ideia de que lixo é apenas matéria fora do lugar, a partir da ilustração de que um papel em cima da mesa pode representar a possibilidade de elaboração de um texto, enquanto um papel amassado na rua é visto apenas como lixo. Coloca-nos, então, um simples questionamento, que revela um ponto de vista inovador: Será que a questão do lixo é apenas uma forma de como ver as coisas?

Os resíduos sólidos urbanos (RSU), popularmente conhecidos por *lixo*, representam uma das consequências mais perceptíveis da poluição ambiental, constituindo um importante segmento do saneamento urbano. Os problemas advindos da má gestão e disposição dos RSU têm abrangência global, e se fazem unanimemente presentes, ainda que em diferentes escalas, em todos os países do mundo. A principal dificuldade, no entanto, não reside nas estratégias de gerenciamento dos resíduos ou na ausência de tecnologias para seu tratamento, mas, sim, na forma como ele é visto perante a sociedade em geral: como lixo. Voltando ao questionamento de Moacyr Scliar (1999), se trata principalmente de uma questão de ótica, onde a solução habita na percepção do resíduo não mais como lixo, mas como resultado de uma cadeia produtiva, que merece receber seu devido valor como produto passível de ser utilizado como insumo de diferentes processos.

A crescente geração de resíduos sólidos em meios urbanos, cada vez mais diversificada, e sua necessidade de tratamento e disposição final, alinham-se entre os mais graves problemas ambientais enfrentados de forma indistinta por países industrializados e sociedades em desenvolvimento. Isso se deve ao fato da geração ser proporcional ao aumento da população e desproporcional à disponibilidade de soluções para o gerenciamento desses resíduos, já apontavam Isaia, Isaia e Roth, em 1999, demonstrando uma realidade que ainda se faz presente após quinze anos de estudos e investimentos na área.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, representa o primeiro grande passo para a melhora

da gestão dos RSU, impondo, dentre outras obrigações, a responsabilidade dos Municípios em dar o tratamento e destinação final ambientalmente adequados a seus resíduos. Estabelece, em suas diretrizes, ações que devem obedecer a uma hierarquia pré-definida, muitas vezes conhecida como política dos 3R's: Reduzir, Reutilizar e Reciclar, antes de se pensar em uma disposição final do resíduo. A ordem de preferência dos 3R's deve ser obedecida em todos os âmbitos da gestão de resíduos sólidos: deve-se primeiro reduzir ao máximo a produção, reutilizar somente quando não for mais possível a redução, e reciclar apenas quando as possibilidades de reutilização tenham se esgotado. A destinação final deve ser a última medida adotada para o resíduo, aplicada apenas quando não houver mais possibilidades de tratamento e utilização desse, ou seja, quando ele realmente puder ser considerado um rejeito (BRASIL, 2010).

Em nível internacional, a política dos 3R's foi modificada e atualizada, evoluindo para o conceito hoje conhecido por 4R's: Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Recuperar. Esse novo conceito estabelece – além do princípio da prevenção da geração de resíduos, tendo como ponto de partida a redução – a ideia de recuperação dos resíduos sólidos, definida como um processo de tratamento que produza energia, exemplificada por processos de digestão anaeróbia, incineração com recuperação energética e gaseificação, dentre outros, conservando, assim, os combustíveis fósseis. Esse modelo tem sido muito aplicado como ferramenta na resolução dos problemas advindos da crescente geração de resíduos sólidos pela sociedade industrial (IDRC, 2008; DEFRA, 2014).

Figura 1 - Hierarquia da gestão dos resíduos sólidos urbanos



Fonte: Adaptado de DEFRA, 2014.

Percebe-se então, sob uma visão mais ampla, com base na problemática da destinação final no Brasil aliada aos princípios estabelecidos pela PNRS para a gestão correta dos resíduos sólidos, que essa não pode ser resumida somente à qualidade da disposição final em aterros sanitários, fazendo-se necessário o incentivo de iniciativas não só de redução e reutilização dos resíduos, como também de reciclagem, seja essa realizada na forma mais usual de reciclagem de materiais, ou através de processos de reciclagem que visem a recuperação energética dos materiais.

Com este trabalho, pretende-se analisar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Florianópolis, definidos aqui apenas pelos resíduos domiciliares, de forma a avaliar a viabilidade de implantação de uma unidade de tratamento de RSU como alternativa de reciclagem energética anterior à disposição final dos resíduos. Neste estudo, será avaliada a utilização da técnica de incineração com recuperação energética como alternativa para esse tratamento. A proposta desse processo como etapa anterior à disposição final no aterro sanitário de Biguaçu, para onde hoje são destinados os RSU da região, não só pretende reduzir o volume de RSU encaminhado ao aterro e as emissões de gases do efeito estufa oriundas desse processo, como também reciclar a parte combustível do resíduo ao convertê-lo em fonte de geração de energia.

O processo de incineração é uma tecnologia de tratamento térmico de resíduos sólidos que visa a geração de energia elétrica e calor através da queima dos resíduos sob condições controladas. De forma simplificada, o processo converte os resíduos em calor, gases e cinzas, exigindo o controle e tratamento desses antes de sua emissão na atmosfera. A instalação de usina incineradora de RSU no município de Florianópolis com tecnologia avançada de operação e, principalmente, de controle de emissão de gases, pode reduzir significativamente o volume de RSU a ser depositado em aterro sanitário e disponibilizar o tratamento adequado a estes resíduos. Além disso, de acordo com Morgado e Ferreira (2006), a incineração dos RSU também objetiva a cogeração de energia elétrica, que pode vir a atender a região no entorno de onde será instalado, de modo que o aproveitamento energético viabilizaria, no âmbito econômico, os custos para a sua implementação.

Neste sentido pretende-se, com este trabalho, propor uma alternativa para a problemática da destinação dos resíduos sólidos que sirva também como solução parcial para outro problema vivenciado diariamente no Brasil: a geração de energia. A matriz energética brasileira é hoje altamente dependente da fonte hidroelétrica. Ainda que

essa possa ser considerada uma forma de energia renovável e limpa, e os recursos naturais brasileiros favoreçam a utilização dessa fonte, é interessante que o país busque meios de diversificar sua matriz energética, tornando-se menos dependente de apenas uma forma de produção de energia e investindo em outras possibilidades. A incineração de resíduos sólidos com recuperação energética surge então como uma excelente alternativa para a geração de energia, proporcionado que uma única medida sirva como solução parcial para dois problemas a partir de uma política em comum, uma vez que a demanda por recursos energéticos cresce no mundo de forma tão preocupante quanto a produção de resíduos. Fazer com que as curvas de crescimento da geração de resíduos e da demanda energética interajam de forma harmônica representa um dos grandes desafios da atualidade, razão pela qual vem crescendo o número de países que investem no aproveitamento energético dos resíduos.

Esse processo de destruição térmica dos resíduos resulta na produção de gases, que devem ser tratados antes de serem emitidos para a atmosfera, devido à presença de poluentes. Ressalta-se que é fundamental a garantia de um adequado sistema de tratamento de gases junto ao processo de incineração, de forma a assegurar que os níveis de emissão de gases e materiais particulados obedeçam aos padrões estabelecidos pela legislação específica.

É de consenso geral que o processo de incineração costuma gerar bastante polêmica e opiniões adversas, tendo baixa aceitação cultural no contexto brasileiro. Portanto pretende-se, também neste trabalho, aprimorar o estudo do tema a partir de uma revisão na literatura e apresentação de aspectos positivos e negativos do processo, verificando a veracidade e aplicabilidade desses no cenário nacional.

Espera-se obter uma conclusão quanto à viabilidade de implantação de uma usina de recuperação energética de resíduos sólidos em Florianópolis, a partir do potencial energético dos resíduos domiciliares gerados na cidade e de análise dos possíveis impactos ambientais, discutidos com base em uma contraposição dos aspectos positivos e negativos do processo de incineração.

1.1 Justificativa

No Brasil, assim como em diversas outras nações, enfrenta-se diariamente a preocupação sobre como lidar com a questão dos resíduos sólidos. O modelo de desenvolvimento atual, pautado pela maximização dos padrões de conforto e pelo excesso de consumo que gera um

desperdício desmedido, resulta na geração excessiva de resíduos, que, por sua vez, cresce a ritmo mais acelerado que o próprio aumento populacional. O desafio central dessa questão reside na busca pelo equacionamento da geração de resíduos e da gestão adequada desses, de forma a evitar os impactos socioambientais que resultam de um gerenciamento pouco eficaz.

O quadro nacional se agrava na medida em que se depara com a ínfima presença de soluções adequadas para esses resíduos, limitadas a processos familiares, que resultam em alternativas de tratamento e disposição muitas vezes antiquadas e obsoletas.

Diante desse quadro, este trabalho foi desenvolvido visando à diversificação das formas de tratamento e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos gerados. Com o objetivo principal de estimar o potencial energético dos RSU de Florianópolis, pretende-se analisar a viabilidade de inserir a etapa de tratamento térmico dos RSU como alternativa anterior à disposição final desses resíduos. A estimativa do potencial energético se faz necessária na medida em que o processo de incineração só se torna justificável se aliado à recuperação energética, constituindo não só uma alternativa de tratamento dos resíduos, mas também uma fonte de produção de energia.

Assim, a justificativa deste trabalho está diretamente relacionada com as diretrizes estabelecidas pela PNRS e os conceitos de preservação ambiental, visto que o gerenciamento precário dos RSU gera uma série de problemas ambientais, enquanto que soluções adequadas podem não só reduzir os impactos causados ao meio ambiente, como também trazer diversos benefícios socioeconômicos inseridos nesse e em outros contextos, como a diversificação da matriz energética.

1.2 Objetivos

De forma a elucidar o propósito com que este trabalho foi desenvolvido, apresenta-se aqui o objetivo geral deste estudo, assim como os objetivos específicos que se pretende atingir com ele.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estimar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis, propondo sua aplicação como alternativa energética na produção de eletricidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a)** Levantar os dados referentes à geração e composição dos RSU no município de Florianópolis;
- b)** Definir os resíduos a serem utilizados como combustível para o processo de incineração;
- c)** Estudar a aplicação do processo de incineração como alternativa para o tratamento térmico de RSU no município de Florianópolis;
- d)** Contrapor aspectos positivos e negativos do processo de incineração, verificando a veracidade e aplicabilidade desses;
- e)** Revisar os efluentes da incineração, analisando as tecnologias de tratamento disponíveis para esses.

Importante ressaltar que a proposta de incineração aqui apresentada não exclui a atividade de reciclagem, conforme prevista na PNRS, garantindo, portanto, o incentivo a essa atividade e a inserção dos catadores no mercado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura referente ao tema estudado, elaborada com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre o assunto, identificando diferentes conceitos e posicionamentos sobre os tópicos abordados. Dividida em cinco tópicos principais, esta revisão apresenta, primeiramente, o conceito de resíduos sólidos urbanos, seguido da concepção de gestão integrada de RSU e diferentes formas de tratamento desses resíduos. O quarto tópico tem por objetivo esclarecer o funcionamento de uma planta de incineração, apresentando um pouco de seu histórico e experiências locais. Em seguida, apresenta-se o conceito de recuperação energética, proposta, neste trabalho, através do processo de incineração de RSU. Por fim, é feita uma revisão dos efluentes do processo e suas respectivas técnicas de tratamento.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

No Brasil, o termo *resíduos sólidos urbanos* caracteriza aquele resíduo cujo gerenciamento é, por definição legal, de responsabilidade das Prefeituras Municipais, incluindo o resíduo domiciliar, comercial e público (ISAIA; ISAIA; ROTH, 1999). Para McDougall et al. (2001), resíduos sólidos são objetos que as pessoas não querem mais, não precisam ou para os quais não existe mais uso, que requerem um tratamento e/ou disposição final, definição essa também adotada pelo PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, e muitas vezes utilizada como conceito público geral (IDRC, 2008).

Vale ressaltar, contudo, que os resíduos sólidos urbanos carregam consigo um grande valor agregado, podendo ser utilizados posteriormente em processos de tratamento, que visam desde o seu reaproveitamento até sua utilização para geração de energia. O Manual de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos na América Latina (IDRC, 2008) enfatiza que o termo *sem uso* é relativo, uma vez que o que não apresenta uso para determinada pessoa pode ser transformado em matéria-prima para um novo produto ou processo.

Neste viés, Lima (2001) define resíduo sólido como todo material heterogêneo (inerte, mineral e orgânico) resultante de atividades humanas e da natureza, que pode ser utilizado de forma a promover a economia de recursos naturais.

Os RSU são, portanto, os materiais resultados das atividades cotidianas da sociedade urbana, de origem principalmente doméstica, comercial e de limpeza pública. Esses materiais costumavam ser vistos

pela população como objetos sem valor, sendo normalmente descartados por serem considerados *lixo*.

A palavra *lixo*, no entanto, tem pouca empatia perante a sociedade, o que incentiva sua displicência sobre o material gerado. Lixo, na realidade, deveria ser apenas o rejeito oriundo dos processos de produção e consumo, material esse que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação, não apresenta outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (FEAM, 2012).

A geração de resíduos sólidos em meio urbano tem crescido de forma cada vez mais diversificada, apresentando-se proporcional ao aumento populacional (ISAIA; ISAIA; ROTH, 1999). De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014, relatório anual da ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, lançado em 27 de julho de 2015, foram geradas cerca de 215 mil toneladas de RSU por dia no país em 2014, totalizando 78,6 milhões de toneladas anuais. Esse valor representa um aumento de 2,9% em relação ao ano de 2013 (Figura 2), índice superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%.

Figura 2 - Geração de RSU (t/ano)

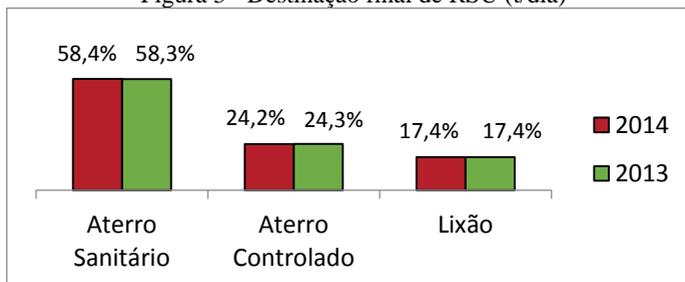


Fonte : ABRELPE, 2015.

Se compararmos a quantidade de RSU gerada e a coletada em 2014, percebe-se que o país contou com uma cobertura de coleta de 90%, o que mostra que pouco mais de 7 milhões de toneladas deixaram de ser coletadas neste ano e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio. Isaia, Isaia e Roth (1999) defendem que por trás dessa realidade residem deficiências no gerenciamento dos resíduos sólidos, que vão desde o não oferecimento do serviço por parte do Poder Público Municipal até a abrangência reduzida da atividade, o que caracteriza uma coleta não universal e vai de encontro aos princípios da PNRS.

Cada cidadão brasileiro produz em torno de 1,06 kg de resíduos por dia, ainda segundo relatório do ano de 2015 da Abrelpe. A disposição final destes resíduos em 2014 teve destino adequado somente para 58% dos resíduos gerados, sendo 24% dos resíduos enviados para aterros controlados e 17% ainda depositados em lixões (Figura 3), valores que se mantiveram estáveis em relação à 2013. A PNRS, quando promulgada, havia fixado o prazo de 02 de agosto de 2014 para a extinção total dos lixões e implantação da destinação final ambientalmente adequada de resíduos em todo o País, prevendo a possibilidade de acusação por crime ambiental às prefeituras que mantivessem em funcionamento seus lixões a céu aberto. O prazo estipulado pela Lei expirou, e apesar das disposições e punições previstas, ainda hoje há um grande percentual de lixões abertos, recebendo resíduos como forma de destinação final, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Destinação final de RSU (t/dia)



Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2015.

2.2 Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos

A PNRS conceitua gestão integrada de resíduos sólidos como um conjunto de ações que buscam soluções para os resíduos, considerando as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social (BRASIL, 2010). Para Lima (2001), a gestão integrada de resíduos sólidos é definida por políticas e instrumentos aplicados em atividades referentes à tomada de decisões estratégicas, enquanto que o gerenciamento refere-se a aspectos operacionais da questão, englobando fatores de desempenho, como produtividade e qualidade. Em suma, o gerenciamento é o componente operacional da gestão dos resíduos sólidos, abrangendo etapas de prevenção, redução, segregação, reutilização, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento,

recuperação de energia e disposição final (LIMA, 2001; MANSOR et al., 2010).

A gestão integrada de resíduos sólidos pode ser entendida, de acordo com Mesquita Júnior (2007), como um sistema de manejo desses resíduos, que considera uma ampla participação e intercooperação de diferentes setores da sociedade, assim exemplificados: governo central e local, setor formal, setor privado, ONGs, setor informal, catadores, comunidade e todos os geradores e responsáveis pelos resíduos. Visa, então, a integração desses setores de forma articulada, de modo a possibilitar um desenvolvimento uniforme e harmônico entre os interessados, o que permite perfazer todos os objetivos propostos de maneira adequada a cada comunidade. Mesquita Júnior (2007) ainda afirma que o sistema deve definir estratégias, ações e procedimentos que busquem tanto o consumo responsável quanto a promoção de trabalho dentro de princípios que proporcionem um gerenciamento sustentável.

O conceito de gestão integrada de resíduos sólidos considera o ciclo de vida inteiro de um produto, incluindo produção, consumo, descarte e disposição final. Na prática, esse conceito vai desde a minimização da geração de resíduo no processo produtivo, incluindo sua embalagem, até a maximização de sua reutilização através da implementação de sistemas de coleta mais apropriados, além da aplicação de processos e tecnologias de tratamento, recuperação e reciclagem. Dessa forma, apenas o resíduo sem qualquer utilidade estaria disponível para a disposição final (IDRC, 2008).

Sob uma visão mais específica, a gestão de resíduos sólidos no Brasil, seguindo os princípios estabelecidos na PNRS, estabelece ordens de prioridade para o gerenciamento, não podendo esse ser resumido à disposição final do resíduo. A PNRS, em seu artigo 9º, expõe claramente a hierarquização da não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Conhecida, de forma simplificada, como política dos 3R's – reduzir, reutilizar e reciclar -, a observância das sucessivas medidas consiste na abordagem mais desejável, tanto de um ponto de vista de redução de impactos ambientais, como em relação ao aspecto econômico de redução de custos de coleta, tratamento e disposição de resíduos (CHEREMISINOFF, 2003 apud MAMEDE, 2013). No entanto, Mamede (2013) ressalta que não é possível reutilizar e reciclar todo tipo de resíduo, o que faz com que esse material possua valor através de energia recuperada, ou na forma de produtos, como o composto orgânico. A recuperação energética encontra-se em um patamar

intermediário da hierarquia de gestão sugerida pela PNRS, porém é de suma importância ressaltar que o uso energético deve respeitar essa hierarquia, conforme ressalta o governo Britânico quando diz que o objetivo do aproveitamento energético do resíduo sólido é extrair o máximo de energia do rejeito, e não incluir uma quantidade máxima de resíduos no processo (DEFRA, 2011).

De acordo com Jacobi (2012), um desafio a ser destacado no âmbito de resíduos sólidos está relacionado com a lógica da gestão, principalmente à crescente dificuldade de áreas para disposição final dos resíduos e ao desperdício de materiais recicláveis que são depositados como rejeito. Os mesmos autores ainda destacam a problemática da aplicação de práticas gerenciais inadequadas, apesar da existência de legislação desde a década de 1970, levantando que, embora exista uma grande abrangência da cobertura da coleta de resíduos no Brasil, existe uma baixíssima cobertura de coleta seletiva e compostagem.

A PNRS prevê, como principal instrumento do gerenciamento e da gestão integrada dos resíduos sólidos, a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), podendo esses serem elaborados em nível nacional, estadual, municipal, ou até mesmo local, como um PGRS de uma empresa, por exemplo (BRASIL, 2010). Os planos são instrumentos fundamentais da gestão, uma vez que representam a ferramenta central para assegurar a formulação, implantação e operacionalização da gestão dos resíduos sólidos. Ressalta-se que a Lei nº 12.305/2010 estipulou o prazo de 2 anos (até agosto de 2012) para a elaboração dos Planos Municipais e Estaduais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, prevendo a interdição do acesso a recursos da União destinados a serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos para aqueles que não os elaborassem. Ainda hoje, no entanto, existem diversos municípios que não elaboraram seus planos.

2.3 Alternativas de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

O tratamento de resíduos sólidos, de acordo com Monteiro et al. (2001), consiste em tecnologias ou procedimentos que objetivam reduzir a quantidade ou potencial poluidor dos resíduos através do seu descarte em ambiente adequado ou de sua transformação em um material inerte ou biologicamente estável.

O principal objetivo das alternativas disponíveis de tratamento é a valorização dos resíduos e redução de impactos ambientais, não só reduzindo a exploração de recursos naturais e a poluição, como também gerando oportunidades de emprego, fontes de renda e aumento da vida

útil dos sistemas de disposição final. Essas alternativas devem ser precedidas de estudos de viabilidade técnica e econômica, visto o emprego de fatores restritivos em seu processo (ZANTA; FERREIRA, 2003).

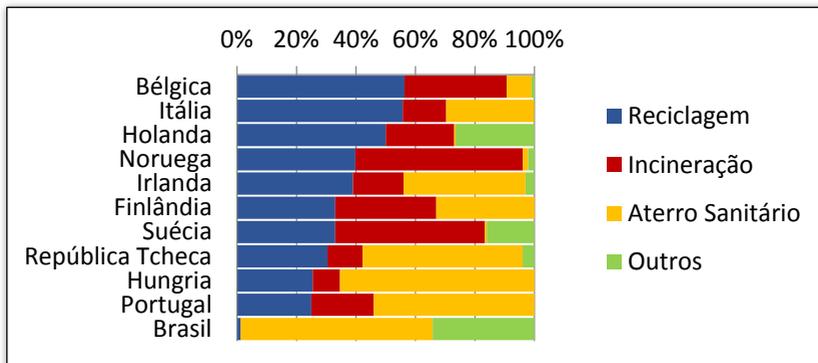
O tratamento de resíduos pode ocorrer principalmente através de processos térmicos ou biológicos. As formas de tratamento térmico utilizam o calor para recuperar, separar ou neutralizar determinadas substâncias presentes nos resíduos, também reduzindo massa e volume e produzindo energia térmica, elétrica ou mecânica (FEAM, 2012). Esse tipo de tratamento pode ser aplicado a qualquer resíduo que tenha em sua composição os elementos Carbono e Hidrogênio, independente de suas fontes de origem. O Manual de Gerenciamento Integrado (CEMPRE, 2010), realça que o tratamento térmico de resíduos, no contexto de um sistema de gerenciamento integrado, deve estar sempre associado à implantação de mecanismos e políticas de redução e reciclagem de resíduos.

O tratamento biológico é também uma forma de degradação da matéria orgânica biodegradável, onde se utiliza da ação de microrganismos para realizar processos de estabilização e oxidação dessa matéria. Esses processos podem ser aplicados ao tratamento de resíduos orgânicos biodegradáveis, tais como: restos de alimentos e poda, madeiras, papéis, papelão, etc. Além disso, o tratamento biológico possui larga aplicação em processos de tratamento secundário de águas residuárias (FEAM, 2012).

Dentre as formas mais utilizadas de tratamento, destaca-se a reciclagem, os aterros sanitários com recuperação energética, as usinas de incineração ou outras formas de queima com recuperação de energia, a biodigestão e processos de compostagem. É importante ressaltar que tais tecnologias não devem ser concebidas isoladamente, ou seja, de forma a extrair sua máxima capacidade, deve-se operá-las em conjunto, para que uma possa suprir as deficiências da outra.

Evidenciando o atraso do sistema de gestão de RSU brasileiro em comparação a outros países, verifica-se que nos idos de 1999, a Europa já se encontrava a frente do restante do mundo em termos de tratamento de RSU, utilizando mais de 27 milhões de toneladas de RSU para gerar eletricidade e aquecimento, com base em dados da Corporação de Alternativas Avançadas de Energia (FARRET, 1999). Dados mais recentes (CEWEP, 2014) apontam o contínuo crescimento e investimento nesse setor, sendo a reciclagem de RSU a tecnologia mais utilizada atualmente em países desenvolvidos, seguida do tratamento térmico, conforme demonstrado no Figura 4.

Figura 4 - Formas de Tratamento de Resíduos Sólidos em Países Europeus



Fonte: Adaptado de CEWEP, 2014 e IBGE, 2008.

De modo geral, em 2010, os países da União Europeia tiveram 38% dos seus resíduos aterrados, 22% incinerados, 25% reciclados e 15% compostados. Dentro os países com maiores índices de disposição final em aterros sanitários encontra-se a Bulgária (100%), Romênia (99%) e a Lituânia (94%). Por outro lado, os países que lideraram o ranking de menores taxas de aterramento foram Alemanha e Holanda (0%), Bélgica e Suécia (1%) e Dinamarca (3%). Paralelamente, os países que mais apresentaram, naquele ano, tratamento de RSU por incineração foram Dinamarca (54%), Suécia (49%), Holanda (39%), Bélgica (37%) e França (34%) (CMS, 2013). Percebe-se, com base nessas estatísticas e no quadro apresentado na Figura 4, a predominância, nos países mais desenvolvidos, dos processos de reciclagem e incineração sobre a disposição final em aterros sanitários.

2.3.1 Reciclagem

O processo de reciclagem é definido por Monteiro et al. (2001) como a separação de determinados materiais do lixo domiciliar com a finalidade de trazê-los de volta à indústria, sendo transformados em produtos novamente comercializáveis no mercado de consumo. Calderoni (1997) ainda define reciclagem como um reprocessamento de materiais, dando aos descartes uma nova vida e ressuscitando materiais.

A técnica da reciclagem transforma os materiais em novos produtos através da alteração de suas características físico-químicas, fato que a diferencia da reutilização. Dependendo de suas características

de composição, o resíduo pode ser reciclado e posteriormente utilizado na fabricação de produtos com a mesma finalidade ou com finalidade distinta (MANSOR et al., 2010).

Alguns materiais têm interesse especial para a reciclagem, como é o caso do alumínio, que tem reaproveitamento praticamente total, ou dos vidros, plásticos, papeis e borrachas, materiais muito visados no setor da reciclagem. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008), a reciclagem permite o acúmulo da conservação de energia, devendo ser considerada como uma estratégia de aproveitamento energético de RSU, destacada a importância da discussão sobre a viabilidade de cada uma dessas rotas de aproveitamento energético.

Nessa perspectiva, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008) defende o fato de a reciclagem não ser incompatível com outros usos ou destinos de RSU, afirmando que, embora afete o dimensionamento de projetos de outras alternativas de tratamento, como a compostagem e a incineração, ou até mesmo a disposição final, a reciclagem não deve ser considerada uma rota excludente a essas outras aplicações.

Os plásticos, materiais derivados do petróleo, são produzidos a partir de resinas sintéticas que muitas vezes não são compatíveis entre si, gerando dificuldades em sua reciclagem. A reciclagem não é possível no grupo de plásticos conhecidos como *termofixos*, que uma vez moldados, não podem mais ser fundidos, porém é viável no grupo dos *termoplásticos*, como os tipos PET (Polietileno Tereftalato), usado em garrafas de refrigerante, PEAD (Polietileno de Alta Densidade), usado em baldes e tambores, PVC (Cloro de Polivinila), usado em tubos e conexões de água e esgoto, PP (Polipropileno), usando em embalagens, seringas e outras utilidades domésticas e PS (Poliestireno), usado em copos descartáveis e eletrodomésticos em geral. Nos aterros sanitários, a presença de plásticos dificulta a compactação dos resíduos, podendo reduzir a vida útil dos aterros (ISAIA; ISAIA; ROTH, 1999).

Uma das dificuldades técnicas em se reciclar os resíduos plásticos está no fato de serem fabricados com diferentes tipos de resinas misturados. Para a eficiência do sistema de reciclagem, segundo Bassani (2011), é interessante que se use embalagens compostas pelo menor número possível de resinas diferentes, assim como se deve evitar o uso de materiais com rótulos adesivos ou outros contaminantes.

Bassani (2011) aponta também, dentre algumas limitações na reciclagem dos plásticos, que a mistura de diferentes resinas na composição do material pode criar problemas na hora de seu reaproveitamento industrial, como trincas e perdas de resistência

mecânica. Além disso, também afirma existirem diversos tipos de plásticos não compatíveis entre si, o que pode resultar em materiais defeituosos ou de baixa qualidade. As condições de limpeza das embalagens também podem inibir a reciclagem desses materiais, muitas vezes contaminados com restos de comida, gorduras, papel, etiquetas e sujeiras em geral, o que reduz ou até impossibilita sua venda.

Os papéis para fins sanitários (papel toalha, guardanapo, papel higiênico) não são recicláveis, assim como papéis vegetais, parafinados, carbono, plastificados e metalizados (BASSANI, 2011).

A baixa participação da população no processo de reciclagem é o principal motivo para que muitos resíduos sejam classificados como rejeitos, afirma Bassani (2011), já que para a venda de muitos materiais seria necessário o acúmulo destes por longos períodos e não há, normalmente, estrutura nas Associações de Catadores de Materiais Recicláveis para esse longo armazenamento. Além disso, muitos materiais são considerados como rejeitos devido à falta de mercado local, o que torna sua reciclagem economicamente inviável.

2.3.2 Compostagem

Compostagem, conforme definido por Mansor et al. (2010), é um método de tratamento de resíduos sólidos no qual a matéria orgânica, em condições específicas de temperatura, umidade e aeração, é transformada em um produto estável, chamado composto orgânico, de grande aplicabilidade na agricultura. É um processo aeróbio em que a maior parte da fração de carbono orgânico degradável do resíduo é convertido em CO₂. O processo envolve duas fases distintas: degradação ativa (temperaturas entre 45 e 65°C) e maturação ou cura (temperaturas entre 30 e 45°C) (FEAM, 2012).

Apesar de ser um dos processos de reciclagem de resíduos mais antigos, é também o que possui princípios mais atualizados e de acordo com as exigências atuais, uma vez que se apresenta comprometido com aspectos ambientais (tratamento dos resíduos, controle da poluição e reciclagem de materiais), com a saúde pública (eliminação de vetores) e com o resgate da cidadania (cria oportunidades de empregos, incentiva práticas agrícolas) (PEREIRA NETO, 1990 apud FADE, 2013).

A NBR 13591/1996 define Usina ou Unidade de Compostagem como uma instalação dotada de pátio de compostagem e conjunto de equipamentos destinados a promover e/ou auxiliar o tratamento das frações orgânicas dos resíduos domiciliares (ABNT, 1996). Adicionalmente, na unidade de compostagem é necessário também

implantar a instalação de um sistema de drenagem de líquidos e da canalização do lixiviado produzido pelas leiras para um sistema de tratamento.

Dentre as vantagens do processo de compostagem, destaca-se a reciclagem da matéria-prima existente nos resíduos e a redução da quantidade de resíduos dispostos a um custo menor que o da incineração (MANSOR et al., 2010). Ademais, a compostagem aumenta a vida útil do local de disposição final de resíduos, além de promover o aproveitamento agrícola da matéria orgânica pelo uso de composto orgânico no solo. Ressalta-se também a necessidade de pouca mão de obra especializada para o processo e a geração de renda com a comercialização do composto, além deste não causar poluição atmosférica (FADE, 2013).

No entanto, é importante ressaltar que a compostagem requer uma separação eficiente dos resíduos, o que pode tornar os custos com a coleta diferenciada altos; um tempo de processamento que pode chegar a seis meses; área relativamente grande para operação, além de exigir que haja um mercado de revenda para o composto (FADE, 2013).

Importa destacar que a compostagem, é um método parcial: cerca de 50% dos resíduos não é aproveitado para a produção de composto, necessitando, portanto, de instalações complementares, como aterro sanitário ou incinerador (MANSOR et al., 2010).

2.3.3 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia, para Pinto (1999), é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, onde a matéria orgânica é convertida em biogás pela digestão bacteriana. Essa digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores.

Recentemente, a digestão anaeróbia de resíduos vem despertando grande interesse e sendo utilizada, com sucesso, para vários tipos de efluentes, tanto industriais quanto domésticos, afirma Pinto (1999). Se comparado com métodos aeróbios, o processo apresenta algumas vantagens, visto que o volume do excesso de lodo produzido é significativamente menor, pode ser aplicado em diversos lugares e em diversas escalas, além de ter baixos custos de operação. Dentre os benefícios da digestão em relação ao processo aeróbio, está o fato de todo o gás produzido poder ser coletado e utilizado, ao contrário do gás de aterro, cuja eficiência na coleta é relativamente baixa. Além disso, o

processo também produz um resíduo sólido (ou digestato), que pode ser tratado e usado como fertilizante (ENGEBIO, 2010).

2.3.4 Aterro Sanitário

O aterro sanitário é hoje o método apropriado mais difundido no Brasil para a disposição final de resíduos sólidos. Consiste em sua deposição sobre terreno natural, através do confinamento desses em camadas cobertas com material inerte, seguindo normas operacionais específicas, de forma a evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública (MONTEIRO et al., 2001). No Guia de Orientação para Governos Municipais de Minas Gerais (FEAM, 2012), aterro sanitário é definido como uma técnica de aterramento dos RSU que se dá através da compactação dos resíduos na forma de camadas, sendo essas periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, produzindo assim uma degradação biológica natural e lenta, até a mineralização da matéria biodegradável. Apesar de ser considerada uma técnica simples, existem cuidados especiais e procedimentos específicos, envolvendo desde a seleção e preparo da área, até sua operação e monitoramento.

Essas unidades têm sido amplamente utilizadas no Brasil como a forma mais econômica e ambientalmente segura para disposição final de RSU. No entanto, além de ser um local de disposição final de resíduos, o aterro sanitário também pode ser considerado uma tecnologia de tratamento de resíduos sólidos, uma vez que, sob forma de um reator anaeróbio, utiliza processos físicos, químicos e microbiológicos para tornar a massa de resíduos mais estável (RECESA, 2010 apud FADE, 2013).

Um aterro sanitário, para ser considerado ambientalmente correto perante a legislação, deve ter um sistema de impermeabilização eficiente, isolando os resíduos do solo natural e minimizando a percolação de lixiviados e biogás resultantes dos processos que ali ocorrem. Além disso, deve contar também com um sistema de drenagem e tratamento de lixiviados e gases, podendo esses serem utilizados para aproveitamento de energia. Deve possuir um sistema de drenagem de águas pluviais e um sistema de cobertura, composto por camadas de material terroso aplicadas sobre os resíduos compactados, a fim de dificultar a infiltração de águas pluviais, o espalhamento de materiais leves pela ação do vento, a interferência de catadores e animais, assim como a proliferação de vetores (MANSOR et al., 2010).

Essas unidades devem, portanto, garantir a proteção do meio ambiente, evitando a contaminação das águas subterrâneas pelo

chorume e prevendo um sistema de captação do biogás formado no processo. Esse biogás pode ser queimado na atmosfera ou ter aproveitamento energético, tornando o aterro sanitário mais do que apenas uma forma de disposição final.

A captura do biogás para aproveitamento energético tem se tornado economicamente viável por duas principais motivações, de acordo com Paro, Costa e Coelho (2008): pela geração de energia elétrica para consumo próprio e venda do excedente, e pela possibilidade de obtenção de créditos de carbono a partir da redução das emissões de gás metano. O biogás de aterros é composto por cerca de 50% de CO_2 e 50% de CH_4 , dentre traços de outros constituintes. O metano (CH_4), gás combustível, pode ser utilizado para obtenção de energia, e sua geração em aterros sanitários inicia-se logo após a disposição dos resíduos, podendo continuar por um período de até mais de 30 anos após o encerramento do aterro (MANSOR et al., 2010).

De acordo com dados do World Bank (JOHANNESSE, 1999, p.8), para que o metano do biogás possa ser explorado comercialmente, através de recuperação energética, o aterro deve receber, pelo menos, 200 toneladas de resíduos por dia, ser dimensionado para uma capacidade mínima de 500.000 toneladas, e já ter uma altura mínima de enchimento de 10 metros. O gás pode ser direcionado para a produção de calor e energia, ou utilizado diretamente como combustível de veículos. A principal importância da utilização desse gás reside na redução de sua emissão na atmosfera, visto que o metano tem grande contribuição nas emissões de gás de efeito estufa, que provocam o aquecimento global, sendo muito mais ativo na retenção de calor da estratosfera do que o dióxido de carbono. Algumas estimativas indicam que em torno de 20% das emissões totais de metano na atmosfera provêm de aterros sanitários e esgotos (MANSOR et al., 2010).

Os sistemas de aterros sanitários apresentam vantagens relacionadas, principalmente, aos baixos custos de investimento e operação, aliadas a sua simplicidade e flexibilidade operacional, sendo capazes de operar normalmente mesmo quando ocorrem flutuações nas quantidades de resíduos a serem aterradas. Por outro lado, é uma técnica que não trata realmente os resíduos, apenas assegura seu correto armazenamento no solo para decomposição. Requer áreas cada vez maiores, além de sofrer ações de condições climáticas e apresentar riscos de contaminação do solo e da água subterrânea. (MANSOR et al., 2010).

Cheremisinoff (2003) aponta que, apesar de o aterro sanitário ser a prática mais adotada ao redor do mundo para a disposição final de

RSU, essa técnica, que consiste basicamente na estabilização dos resíduos, não é efetiva economicamente a longo prazo, apesar de possibilitar que companhias e municipalidades atendam a conformidades ambientais.

2.3.5 Incineração

Incineração, para Monteiro et al. (2001), é um processo de queima, na presença de oxigênio, em que os materiais a base de carbono se decompõem, gerando calor e um resíduo de cinzas. Menezes, Menezes e Gerlach (2000) expandem ainda mais essa conceituação, ao definirem incineração como um processo de redução do peso, volume e características dos resíduos, além de ser um processo de reciclagem da energia liberada na queima dos materiais que visa a produção de energia elétrica e de vapor.

De acordo com McDougall et al. (2001), a incineração de resíduos sólidos pode atender até quatro objetivos: a redução do volume; a estabilização dos resíduos, reduzindo a geração de biogás e do teor de orgânicos no lixiviado quando o resíduo resultante do processo for depositado em aterros sanitários; a recuperação de energia dos resíduos – todas as plantas modernas de incineração de RSU têm sistemas acoplados de geração de energia; e a esterilização dos resíduos, no caso de tratamento de resíduos sólidos de serviços de saúde, para destruição de patógenos e infectantes.

No que diz respeito ao gerenciamento dos RSU, Calderoni (1997) afirma que a técnica pode ser vista como um processo complementar ao aterramento e programas de reciclagem, na medida em que esses sejam economicamente viáveis localmente. Seu principal objetivo, neste contexto, é possibilitar o tratamento térmico aos RSU que não possuam potencial de valorização pelos processos de reciclagem (SANTOS, 2011).

Morgado e Ferreira (2006) defendem que a incineração pode ser ambientalmente correta e aliada da proteção ambiental, desde que as plantas de incineração sejam operadas por equipes qualificadas, tenham equipamentos eficazes quanto ao controle da poluição e quanto à disposição final dos resíduos gerados. Além disso, elas devem ser monitoradas e acompanhadas pela comunidade e por agentes ambientais. Neste viés, a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2012) indica que, além de rigorosos sistemas de tratamento e disposição de efluentes, as plantas de incineração devem conter sistemas de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas e

superficiais do seu entorno, assim como do nível de ruído ambiental, da qualidade do ar, do solo e até mesmo dos alimentos produzidos na área que irá sofrer influência do empreendimento.

Morgado e Ferreira (2006) ainda apontam que, além de ser um possibilidade de substituição de energia e emissões das estações de energia, a utilização do processo de incineração não só reduz o volume a ser depositado em aterros, como ajuda a evitar a emissão de metano advinda da disposição de resíduos nessas unidades.

2.4 O Processo de Incineração

Incineração é o nome dado a um processo de combustão controlada, que tem por princípio básico a reação do oxigênio com combustíveis presentes no resíduo (como carbono, hidrogênio e enxofre), em temperaturas superiores a 800°C, convertendo energia química em calor. Entre os produtos da combustão, além do vapor d'água, encontra-se CO₂ e SO_x, HCl, F, CO, NO_x, material particulado, metais e substâncias orgânicas (como dioxinas) na forma gasosa ou aderidas ao material particulado. O processo também gera rejeitos (cinzas volantes e escórias) de materiais inorgânicos que não participam das reações de combustão. As cinzas volantes são normalmente retidas em sistemas de filtragem, enquanto a escória se adere nas paredes da fornalha (FEAM, 2012).

O processo de incineração com recuperação energética, não ocorre, segundo Santos (2011), em um forno isolado, mas sim, através de uma completa instalação industrial que contenha os seguintes componentes: local para alimentação e armazenamento de resíduos, combustão no forno, recuperação do calor com produção de vapor e eletricidade, dispositivos de controle de poluição (tratamento dos gases da combustão) e dispositivos de manipulação dos resíduos do processo (cinzas e águas residuais).

Plantas de incineração, em geral, possuem altos custos iniciais, de operação e manutenção, principalmente em decorrência dos investimentos nos equipamentos de tratamentos de efluentes. Por essa razão existe a necessidade de as plantas venderem a energia produzida, de forma a se justificarem economicamente (HENRIQUES, 2004; MENEZES; MENEZES; GERLACH, 2000).

Menezes, Menezes e Gerlach (2000) indicam que a geração de energia elétrica se torna rentável apenas em plantas com capacidade de processamento acima de 250 toneladas por dia. Valores abaixo desse precisam utilizar da energia gerada para manutenção da própria planta.

Devido às suas características potencialmente poluidoras, todas as instalações de incineração devem dispor de uma autorização ou licença para funcionamento. Essa licença, que deve ser emitida pela autoridade competente, é específica quanto às categorias e quantidades de resíduos a serem tratados, assim como à capacidade da planta de incineração e os procedimentos de amostragem e medição utilizados para garantir as emissões dentro dos limites permitidos (SANTOS, 2011).

No Brasil, qualquer processo de tratamento térmico necessita passar pelo licenciamento previsto na resolução CONAMA 237/1997. Existe ainda uma resolução específica para plantas de incineração, a Resolução CONAMA 316/2002, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduo, estabelecendo os limites máximos de emissão para poluentes a serem lançados na atmosfera, na água e no solo. No Estado de São Paulo, especificamente, a Resolução SMA-079, de 2009, estabelece diretrizes e condições de operação e licenciamento da atividade de tratamento térmico de RSU em usinas de recuperação de energia.

Os fornos de incineração podem ter diversas configurações. Existem, basicamente, quatro tipos de processos de incineração de RSU disponíveis em escala comercial: combustão em grelha, combustão em câmaras múltiplas, combustão em leito fluidizado e combustão em corpo rotativo, sendo mais conhecidos os processos de grelha e leito fluidizado (PARO; COSTA; COELHO, 2008).

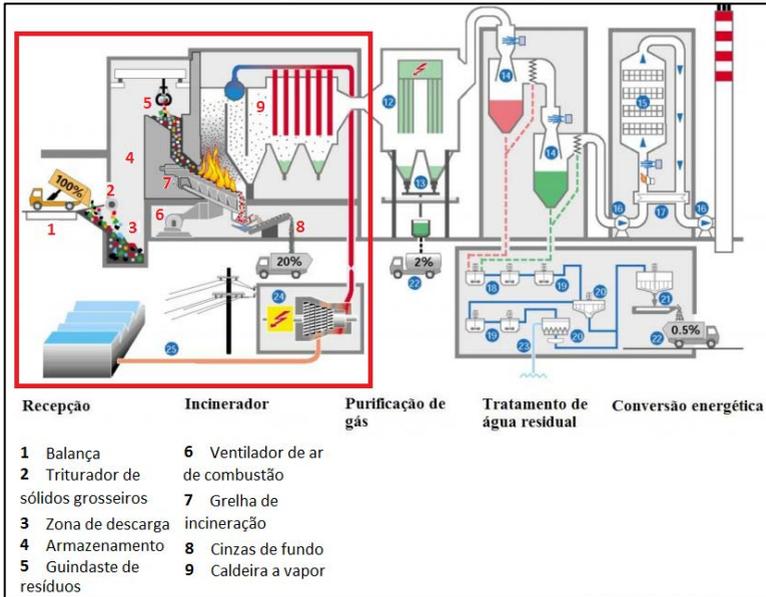
a. Sistema de Combustão em Grelha

A combustão em grelha é a forma de incineração mais utilizada para RSU no estado bruto, envolvendo a queima dos resíduos à medida em que eles vão sendo depositados no silo de recepção. Também conhecida por tratamento térmico em massa, é a forma mais simples e comum de tratamento térmico, podendo ser dividida em dois conceitos principais: a queima massiva (*mass burn*), onde o resíduo sólido bruto é misturado sem operações de triagem para retirada de materiais recicláveis, e a queima de não recicláveis, onde os resíduos passam por etapas de triagem, restando apenas resíduos orgânicos úmidos e materiais não aproveitáveis para serem incinerados (ENGEPIO, 2010).

Neste sistema, o resíduo é vagorosamente carregado até a câmara de combustão (fornalha) através de grelhas mecanizadas. Os fluxos de entrada e saída da grelha são contínuos e as condições do sistema são controladas de forma a otimizar o processo e garantir a combustão completa do resíduo enquanto é movido pela grelha. Ao final da grelha

costuma-se ter um resfriador para as cinzas quentes remanescentes do processo (MAMEDE, 2013).

Figura 5 - Planta típica de incinerador com grelhas móveis



Fonte: Adaptado de DOKA, 2009 apud MAMEDE, 2013.

O processo de combustão em grelha envolve, geralmente, uma grelha móvel inclinada com ação reversa, o que permite operar com materiais de granulometria variada. À medida em que ocorre o deslocamento dos resíduos na grelha, o material vai sendo aquecido, ocorrendo sua secagem e conseqüente perda dos compostos orgânicos voláteis. Cerca de 60% do ar de combustão pré-aquecido é inserido por baixo da grelha, sendo o restante introduzido em alta velocidade sobre a grelha, de forma a criar uma região de elevada turbulência e promover a mistura com gases e vapores gerados (FEAM, 2012).

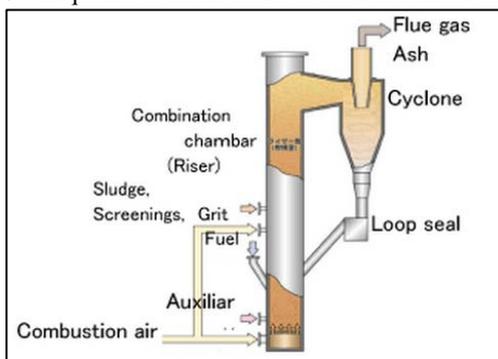
b. Leito Fluidizado

A tecnologia de combustão em leito fluidizado baseia-se em um sistema onde os resíduos, previamente triturados, são queimados em suspensão e dispersos em leito composto por partículas inertes (areia ou cinzas). Esse leito é mantido em intensa movimentação, devido à

introdução de ar no fundo da caldeira (ENGEBIO, 2010). A técnica, de acordo com Mamede (2013), requer, de modo geral, maior preparação do resíduo em comparação com o sistema de forno com grelhas.

O relatório disponibilizado pela Engebio (2010) diferencia os combustores de leito fluidizado em leito circulante ou borbulhante. Independentemente do leito, há a necessidade de que os resíduos tenham tamanho relativamente uniforme, assim como a granulometria do leito deve ser controlada.

Figura 6 – Esquema de incinerador de leito fluidizado circulante



Fonte: GEC, 2007.

Se comparados com a queima em grelha, os sistemas de leito fluidizado possibilitam a redução de emissões de gases, reduzindo os custos dos sistemas de controle de poluição de ar. Por outro lado, a necessidade do pré-processamento dos resíduos, de forma a retirar os materiais não combustíveis da massa a ser incinerada e triturar os resíduos remanescentes, formando o chamado Combustível Derivado de Resíduo (CDR), torna o processo financeiramente mais custoso (ENGEBIO, 2010).

Ainda segundo o relatório da Engebio (2010), a experiência comercial com essa tecnologia para o tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos é ainda limitada, e sua performance requer maior desenvolvimento para aceitação geral e ganho de competitividade.

2.4.1 Histórico da Incineração

De acordo com Henriques (2004), o processo de incineração vem sendo usado como método de processamento de resíduos desde o início do século XX. Devido à sua ampla utilização, nas últimas décadas, originou tecnologias confiáveis e facilidades modernas, sendo quase todas as plantas de incineração atuais construídas com aproveitamento energético.

Menezes, Menezes e Gerlach (2000) separam a história da incineração no mundo em quatro gerações principais, tendo início posterior à década de 1950, uma vez que, antes dessa data, os processos de incineração ainda eram muito incipientes. A primeira geração (1950-1965) contava com incineradores que operavam apenas com o intuito de reduzir o volume e massa dos resíduos gerados, não havendo processos de tratamento dos gases gerados. Apenas na segunda geração (1965-1975) que começam a surgir os primeiros mecanismos de proteção ambiental, reduzindo as emissões de 1000 mg/Nm^3 a 100 mg/Nm^3 . Surgem, nesse período, as primeiras plantas com grande capacidade e o interesse em projetos de recuperação de calor para geração de energia.

A terceira geração (1975-1990), por sua vez, caracterizou-se pelo desenvolvimento de normas de proteção ambiental, visto o crescente interesse da população em relação à poluição, havendo também um aumento do desempenho energética das plantas. Foi nesse período que começaram a aparecer os lavadores de gases para redução das emissões do processo.

Por fim, na quarta geração, que se estende até os dias atuais, o tratamento de gases foi modernizado e surgiram tecnologias de remoção de poluentes como o NO_x , dioxinas e furanos, com o objetivo de alcançar emissões a níveis próximos de zero. Surgem também tecnologias e conceitos para a disposição final dos resíduos inertes do processo, que podem ser reciclados ou dispostos no meio ambiente, desde que de forma adequada.

Existe ainda uma possibilidade de sofisticação, segundo Dias (2008), dos processos anteriores à incineração, de forma a aumentar a homogeneização, reduzir a umidade e aumentar o poder calorífico dos resíduos, com o objetivo de melhorar a qualidade do combustível e obter uma máxima produção energética.

Menezes, Menezes e Gerlach (2000) afirmam que, nos sistemas da quarta geração, as emissões para a atmosfera ou corpo d'água encontram-se abaixo dos níveis de exigência nacionais e internacionais, mesmo as mais rigorosas. Por outro lado, esses sistemas exigem

investimentos muito elevados, podendo, muitas vezes, custar um valor maior que o próprio incinerador (DIAS, 2008).

No Brasil, predominam incineradores de porte pequeno, que se restringem ao objetivo único de resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos, hospitalares, industriais e aeroportuários (LEME, 2010). Esses consistem em equipamentos simples, estando a grande maioria, hoje, desativada ou incinerando de forma precária. A principal razão para tal é a má operação desses equipamentos, devido ainda ao conceito generalizado de que trabalhar com lixo é punição, fazendo com que os funcionários desses postos recebam pouco treinamento e não exista atenção suficiente ao monitoramento dessas unidades (HENRIQUES, 2004).

Não existem hoje, no Brasil, experiências comerciais em grande escala do processo de incineração para tratamento de RSU com recuperação energética. O único caso nacional de incineração com recuperação energética em funcionamento atualmente é o da planta-piloto da USINAVERDE, localizada no campus da UFRJ, na ilha do fundão, no Rio de Janeiro.

A USINAVERDE é uma empresa brasileira que surgiu, em 2001, como pioneira no desenvolvimento de tecnologias e processos para a implantação de usinas de reciclagem energética. Em 2004, implantou, no campus da UFRJ, um centro tecnológico dotado de uma usina protótipo com capacidade para tratar 30 toneladas/dia de RSU, gerando 440 kW de eletricidade para consumo próprio (USINAVERDE, 2010).

O principal diferencial desse projeto foi o fato de ter sido concebido apenas com equipamentos brasileiros, o que reduz drasticamente o custo desse tipo de tecnologia. A usina possui licença de operação desde o ano de 2005, tendo passado com excelentes resultados no “Teste de Queima”, estabelecido pela resolução CONAMA 316/2002 (SANTOS, 2011).

Há outras iniciativas incipientes no Brasil, como a empresa Estre Ambiental, que já transforma resíduos em Combustível Derivado de Resíduos (CDR) ou em *blend* para cimenteiras. Existe projeto para, em breve, transformar os resíduos em energia elétrica, conforme financiamento de R\$33,9 milhões aprovado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para a Estre Ambiental. De acordo com o BNDES, este é o primeiro financiamento a projeto voltado para a área de RSU que transformará o resíduo urbano em energia.

2.4.2 Descrição Técnica de um Incinerador

Para Santos (2011), quando hoje se fala em incineração, inclui-se o conceito de recuperação energética pois, em qualquer forno utilizado para a queima dos resíduos, existe a necessidade da redução da temperatura dos gases de combustão a valores que possibilitem o seu envio para equipamentos de controle de poluição do ar. Esse resfriamento produz vapor d'água, caracterizando-se então pela possibilidade de recuperação energética desse vapor.

De acordo com Leme (2010), todo e qualquer sistema de tratamento térmico por incineração é composto por unidades de recepção, armazenamento, alimentação e tratamento dos efluentes. Um incinerador com recuperação energética típico, para Mamede (2013), é constituído dos seguintes elementos: recepção e transferência dos resíduos, câmara de combustão, planta de recuperação energética, limpeza dos gases de combustão, manipulação das cinzas de fundo e tratamento de águas residuais.

Henriques (2004) descreve o atual processo de incineração em dois estágios. Inicialmente, o resíduo é queimado na câmara primária, em uma temperatura alta o suficiente para permitir que algumas substâncias se tornem gases e outras virem partículas. Essa temperatura varia, tipicamente, entre 500°C e 900°C. As condições dessa câmara são controladas de modo a reprimir gradientes elevados de temperatura, evitando assim, a volatilização de grandes quantidades de metais presentes nos RSU, como chumbo, mercúrio e outros. Minimiza, também, a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas.

Em seguida, a fase gasosa gerada na câmara primária é levada à câmara secundária, onde é então queimada a uma temperatura mais alta por um intervalo de tempo que permita a combustão completa. Nesse local, a temperatura varia entre 150°C e 1250°C, onde diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO₂ e H₂O. Nessa temperatura, a probabilidade de existirem moléculas com grande número de dioxinas e furanos é praticamente zero (IEA, 1997, ARANDA, 2001 e TOLMASQUIM, 2003 apud HENRIQUES, 2004).

Nenhuma planta de incineração atual é projetada sem um sistema de controle de temperatura. Esses sistemas, segundo Leme (2010), são baseados na injeção de combustíveis auxiliares (normalmente gás natural e óleo combustível), para o caso de ocorrer temperaturas abaixo de 800°C, quando então entram em funcionamento para garantir a eficiência do processo.

Normalmente, em plantas corretamente planejadas e operadas, o uso de combustível auxiliar é pequeno. No entanto, pelo fato de a composição dos RSU não se manter constante no tempo, o uso desse combustível é indispensável. Existe também a possibilidade de se prever uma etapa de pré-tratamento dos RSU, Santos (2011) explica, de forma a manter algumas características dos resíduos constantes, como a umidade e a quantidade de energia presentes. As temperaturas na câmara de pós-combustão devem ser mantidas, no mínimo, a 1100°C, na legislação europeia, e a 1200°C, na legislação brasileira (NBR 11.175). Esse cuidado se dá para garantir a destruição completa de poluentes perigosos. A resolução CONAMA 316/2002, prevê, no caso da incineração de RSU, uma temperatura mínima de 800°C (LEME, 2010).

Após essas etapas de queima, de acordo com Henriques (2004), a parte sólida remanescente é retirada da grelha (no caso de um incinerador com grelhas), sendo que a quantidade desse material varia de 4% a 10% em volume do material original, constituindo um material esterilizado, com aspecto de cinza e apto a ser reciclado ou aterrado. Normalmente, uma pequena quantidade de partículas finas acaba sendo carregada para fora da câmara de combustão junto aos gases, quantidade essa que é posteriormente coletada no precipitador ou filtro.

Neste momento de queima ocorre a liberação da energia presente nos resíduos, que é então transferida para uma caldeira de recuperação, o que gera o vapor. Tanto a temperatura dessa mistura, como a pressão, dependem do design do caldeira. A razão entre a energia transferida ao ciclo de vapor na caldeira e a energia introduzida na câmara de combustão representa a eficiência da caldeira. Na sequência desse processo, os gases de combustão entram no sistema de controle de poluição do ar.

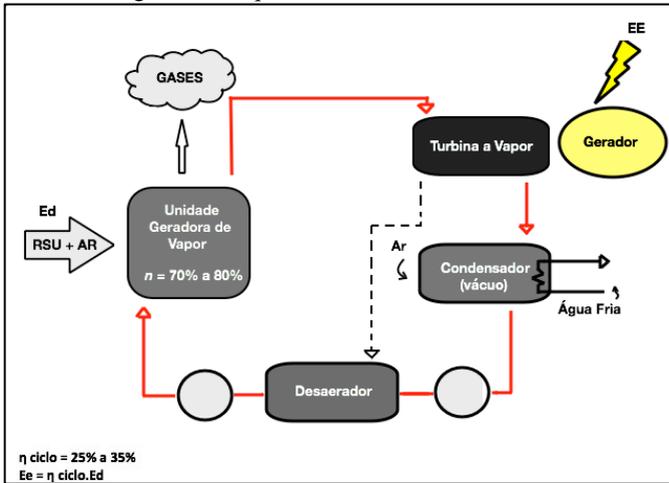
Nos sistemas de tratamento, os gases passam por diversas etapas que visam a remoção de ácidos, partículas finas e poeira, antes de serem enviados para a atmosfera através de chaminés. Esses tratamentos envolvem processos físicos e químicos que serão melhor definidos posteriormente neste trabalho.

Para o presente estudo, considerou-se o processo de incineração com geração de eletricidade oriunda de um ciclo a vapor, conhecido por ciclo de Rankine.

O ciclo de Rankine, segundo Borgnakke e Sonntag (2009), é o ciclo ideal, constituído por processos que ocorrem em regime permanente. Na análise do ciclo, os autores consideram que o rendimento depende da temperatura média na qual o calor é fornecido e rejeitado. A Figura 7 apresenta um esquema simplificado do ciclo de

Rankine, onde o resíduo entra na unidade geradora de vapor na forma de energia disponível (E_d), gerando calor e, conseqüentemente, produzindo vapor superaquecido. A energia térmica do vapor, ao passar pela turbina, é convertida em energia mecânica, que movimenta um gerador, produzindo energia elétrica (E_e). O vapor é direcionado ao condensador e, na seqüência, ao desaerador para remoção de gases dissolvidos no condensado. Por fim, é bombeado de volta à unidade geradora de vapor, fechando o ciclo térmico. A unidade geradora de vapor tem de 70 a 80% de eficiência, enquanto que o ciclo completo costuma apresentar valores de eficiência na faixa de 25% a 30%.

Figura 7 – Esquema de um Ciclo de Rankine

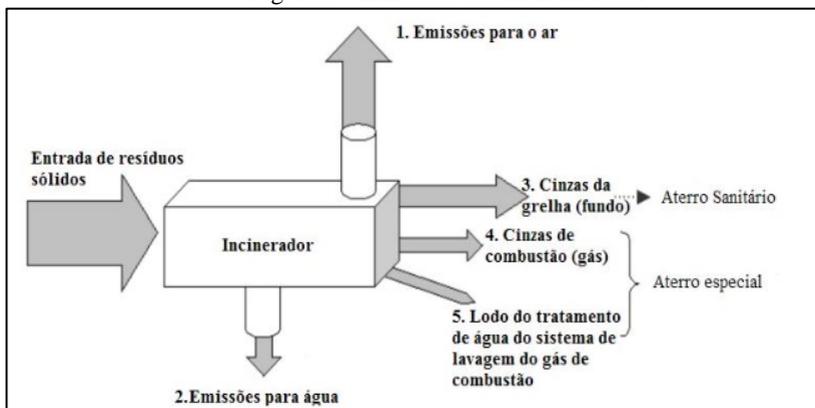


Fonte: Elaboração própria.

2.5 Efluentes da Incineração e Técnicas de Tratamento

O processo de incineração de RSU, em geral, gera efluentes sólidos (escórias e cinzas), gasosos (emissões atmosféricas contendo compostos poluentes) e líquidos, que têm suas emissões para o ar, água e terra. Mamede (2013) resume as emissões como originárias da chaminé, do tratamento de água e da disposição de cinzas, dividindo-as em duas partes: emissões relacionadas à composição dos resíduos de entrada, e emissões associadas aos parâmetros de operação do processo, tais como temperatura e teor de oxigênio disponível.

Figura 8 – Emissões de um incinerador



Fonte: DOKA, 2009 apud MAMEDE, 2013.

Dentre os efluentes sólidos, a escória, produzida no forno de incineração, constitui em sua maioria material inerte, compostos inorgânicos e metais, enquanto as cinzas são geradas em equipamentos de remoção de particulados, o que faz com que essas formem um material de granulometria pequena, compostos inorgânicos e metais pesados (GRIPP, 1998 apud CAIXETA, 2005).

As emissões atmosféricas da incineração são constituídas por gases como gás carbônico (CO_2), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e material particulado (MP). Em menores concentrações, há presença também de ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF), conhecidos como gases ácidos, além de metais pesados (associados ao MP) e produtos da combustão completa, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, dioxinas e furanos (*Op. cit.*). Os poluentes atmosféricos formados dependem dos processos de combustão empregados, assim como da quantidade de elementos de enxofre, compostos nitrogenados, cloro e flúor presente nos RSU (CAIXETA, 2005).

Essas emissões gasosas carregam grandes quantidades de substâncias em concentrações acima dos limites estabelecidos pela legislação, o que requer uma tecnologia de tratamento avançada para neutralizar e remover os poluentes gerados. Caixeta (2005) resume o sistema de depuração dos gases em unidades de lavagem ácida de halogênios, de lavagem alcalina, de lavagem de aerossóis e filtros de manga.

Para esses sistemas de tratamento, no manual da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2012), é sugerido que se utilize como referência os padrões de emissão estabelecidos na Diretiva Europeia 2010/75/UE, por serem mais restritivos que os da Resolução CONAMA 316/2002. Nos países desenvolvidos, onde o processo de incineração é aplicado em larga escala, tem sido exigido monitoramento contínuo dos gases CO, HCl, SO₂, NO_x, HF, NH₃, e do material particulado, havendo, ainda, monitoramentos periódicos de outros elementos, como Pb, Cu, Hg, dioxinas e furanos (FEAM, 2012).

Puna e Baptista (2008), em sua pesquisa, expõem quais os tratamentos disponíveis de acordo com cada poluente, conforme exemplificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Processos físico-químicos utilizados no tratamento dos gases de combustão de um incinerador de RSU

Componente	Técnica Utilizada
NO _x	Remoção seletiva não catalítica com injeção de solução aquosa de amônia na câmara de combustão
HF, HCl, SO ₂	Injeção de leite de cal (Ca(OH) ₂)
Dioxinas, furanos e metais pesados	Injeção de carvão ativado
CO, COV's	Fornecimento de O ₂ em excesso na câmara de combustão
Outras partículas	Filtros de manga

Fonte: Adaptado de PUNA e BAPTISTA, 2008.

As tecnologias aplicadas no processo de incineração também fazem parte do controle da poluição do ar, já que podem ser empregadas visando melhor desempenho na combustão e redução das emissões gasosas, o que diminui a necessidade de equipamentos específicos para o tratamento dos gases (GRIPP, 1998 apud CAIXETA, 2005).

2.5.1 Emissões Atmosféricas

O tratamento desses gases compreende processos físicos e químicos, variando conforme os equipamentos utilizados. A primeira etapa de tratamento, segundo Henriques (2004), consiste em resfriar os gases que saem da câmara secundária com temperaturas entre 1000°C e 1200°C, para, em seguida, neutralizá-los com injeção de hidróxido de cálcio (*dry scrubber*), muito eficiente na neutralização e captura dos gases SO_x e HCl. Uma vez resfriados e neutralizados, os gases passam por um sistema de filtros (filtros de manga, normalmente), que retiram o

material particulado com dimensões até 0,3 μm (fuligens, sais e hidróxido de cálcio). Pode-se também utilizar outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores, ciclones, etc.

Após esses processos, os gases passam então por um leito adsorvente, à base de carvão ativado, que possui três funções: retenção de óxidos nitrosos, evitando-se picos de geração de NO_x e inibindo sua emissão abrupta para a atmosfera; retenção de organoclorados, uma ação que previne a emissão de dioxinas na câmara secundária; e retenção de metais voláteis, apresentando altíssima eficiência neste processo. A perda de calor ao longo desses processos de purificação de gases faz com que estes saiam da chaminé com temperaturas inferiores a 120°C (HENRIQUES, 2004).

a. Gases ácidos

Para os gases ácidos, HCl e HF , Gripp (1998 apud CAIXETA, 2005) afirma que tem sido empregada na Europa e no Japão a técnica de tratamento com lavadores úmidos, embora esses tenham sido primeiramente utilizados para remoção de materiais particulados. Relata, ainda, que essa tecnologia tem limitações, como o alto custo de manutenção, função da deposição de sólidos no reator. Também cita como técnica de controle de gases ácidos o pulverizador de adsorvente seco com emprego de cal, e a injeção de adsorvente seco, com injeção de cal hidratada ou bicarbonato de sódio na câmara de combustão.

b. NO_x

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) podem ser formados a partir do N_2 presente no ar, que é injetado durante a combustão. No entanto, isso só ocorre de forma significativa em temperaturas elevadas (1400°C), o que não é comum em processos de incineração. Para o controle do NO_x , deve-se manter o processo de combustão em níveis adequados de temperatura, umidade, tempo e concentração de oxigênio, o que irá reduzir o poluente (GRIPP, 1998 apud CAIXETA, 2005).

c. Dioxinas e Furanos

As dioxinas e furanos não estão presentes nos RSU, porém são produtos da combustão de componentes clorados dos resíduos, formados durante o resfriamento dos gases incinerados ou em decorrência de alguma irregularidade operacional (EPA, 2011). Essas substâncias

organocloradas possuem compostos altamente tóxicos e podem ser formadas não só a partir de processos de incineração, mas também em outros tipos de combustão, como a queima de madeiras, fornos de cimento, combustão de veículos, processos metalúrgicos, produção de cimento e asfalto, utilitários a carvão, queimadas e outros processos de queima a céu aberto (como queimas em aterros e incêndios) (KULKARNI; CRESPO; AFONSO, 2008; DWYER; THEMELIS, 2015).

Para evitar a formação de dioxinas e furanos no processo de incineração, tanto Puna e Baptista (2008) quanto Paro, Costa e Coelho (2004) consideram importante o controle da temperatura e do tempo de esfriamento dos gases, o qual não deve ultrapassar o limite de 2-5 segundos. Ainda neste sentido, Gripp (1998 apud CAIXETA, 2005) afirma ser possível minimizar a formação e emissão de dioxinas e furanos a partir de alguns fatores da combustão, como a quantidade e distribuição de ar, o uso de combustível auxiliar, quando necessário, a manutenção de temperaturas elevadas na câmara de combustão e o rápido resfriamento dos gases de pós-combustão a temperaturas abaixo de 260°C. Essa solução de resfriamento brusco é também apresentada pelo IPT/CEMPRE (1995 apud CAIXETA, 2005), com a ressalva de que essa técnica pode ser conflitante com a estratégia de recuperação de energia. Justifica, no entanto, que caso esse resfriamento não seja possível, um sistema adequado de tratamento dos gases pode remover as dioxinas junto do material particulado.

Kulkarni, Crespo e Afonso (2008) também sugerem, como formas de tratamento para dioxinas, os coletores de pó, como precipitadores eletrostáticos e filtros de fábrica, os purificadores e o tratamento através da radiação de elétrons, nova técnica que tem sido largamente aplicada nas plantas atuais.

d. Metais Pesados

Metais pesados, hidrocarbonetos e compostos organoclorados são gerados por não serem eliminados completamente no processo, ou porque se formaram durante a incineração. A expressão *metal pesado* é utilizada para designar alguns metais classificados como poluentes, como o cobre, ferro, mercúrio e chumbo.

Além dos métodos de controle da poluição do ar, a separação de materiais como peças de chumbo, pilhas e baterias, antes da combustão, pode diminuir as emissões de metais (IPT/CEMPRE, 1995 apud CAIXETA, 2005).

e. Material Particulado

Para os materiais particulados, partículas pequenas, compostas por uma mistura de sólidos e líquidos, os processos aplicados mais encontrados na literatura são os filtros de manga, precipitadores eletrostáticos ou lavadores de gases.

2.5.2 Efluentes sólidos e líquidos

Conforme mencionado, as cinzas e escórias representam os resíduos sólidos do processo de incineração. Constituídas do material inorgânico presente nos resíduos, sua principal diferença consiste em seu processo de formação: as chamadas escórias são as cinzas de fundo, material não combustível resultante da queima, enquanto as cinzas suspensas retidas pelo sistema de controle de gases são denominadas cinzas volantes.

Os resíduos sólidos do processo (cinzas volantes e escórias), antes de sua destinação final, devem ser caracterizados conforme norma ABNT NBR 10.004. Em alguns países da União Europeia, as cinzas passam por processos de inertização com cimento antes de sua disposição final em aterros sanitários, enquanto as escórias passam por processos de desferrização, em eletroímã, antes de sua reutilização, normalmente como cobertura de aterros sanitários, permitindo que as sucatas ferrosas separadas no processo sejam comercializadas (FEAM, 2012).

No tratamento dos efluentes líquidos, de acordo com Caixeta (2005), os principais métodos aplicados são processos de neutralização, regeneração, sedimentação e dessanilização. Em algumas instalações, parte desses efluentes provenientes do sistema de tratamento de gases tem sido reutilizada em processos de resfriamento de escórias e inertização de cinzas volantes.

2.6 Aspectos Positivos e Negativos do Processo de Incineração

O processo de incineração de RSU tem passado por duras críticas nas últimas décadas, principalmente em decorrência das altas emissões de poluentes que já gerou, o que lhe garantiu uma reputação de prejudicial ao meio ambiente. No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, essa imagem permanece até hoje, congelada em afirmações e conceitos desatualizados, fato que leva o processo a ser

desconsiderado em muitas análises de gerenciamento de RSU. No entanto, conforme demonstrado na fundamentação teórica deste trabalho, o processo tem sido largamente aplicado em países desenvolvidos, como Alemanha, Japão, Suécia, França e Estados Unidos, sendo esse conceito de poluidor, aos poucos, revertido, principalmente devido ao avanço nas tecnologias de depuração de gases e controle de emissões.

Apesar de já ter sido muito nocivo ao meio ambiente, esse avanço das tecnologias de tratamento tornou o processo atraente do ponto de vista ambiental. No contexto americano, por exemplo, a Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) implementou, na década de noventa, um regulamento conhecido como Tecnologia de Máximo Controle Disponível (do inglês, *Maximum Available Control Technology*), o que resultou na redução de 99% das emissões de metais pesados e 99,9% das de dioxinas e furanos, substâncias responsáveis pelas maiores críticas do processo (PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009).

De acordo com Stehlík (2009), ao comparar os limites máximos de emissão válidos para incineradores de resíduos com outras plantas de combustão, pode-se dizer que os novos sistemas estão entre as mais limpas e confiáveis fontes de energia sob a forma de calor e eletricidade. No entanto, o processo de incineração é aqui visto mais como alternativa de destinação final de RSU do que como fonte de energia, o que torna mais atrativo compará-lo a outras tecnologias aplicadas aos RSU, como os aterros sanitários.

Com o objetivo de avaliar os aspectos positivos e negativos do processo de incineração, verificando a veracidade destes, os reais impactos decorrentes do processo e a aplicabilidade da técnica, apresentam-se aqui os resultados obtidos na revisão da literatura. A pesquisa se deu visando à construção de argumentos que permitissem construir um posicionamento a respeito do processo, assim como ao conhecimento dos reais benefícios e malefícios que o sistema pode aportar.

O Quadro 2, apresentado a seguir, resume os principais benefícios e desvantagens encontrados na literatura para o processo de incineração, que serão discutidos posteriormente.

Quadro 2 - Benefícios e Desvantagens da Incineração em relação aos Aterros Sanitários

BENEFÍCIOS	DESVANTAGENS
✓ Redução da massa e volume de RSU	✓ Emissões atmosféricas; potencial poluidor
✓ Requisitos pequenos de área para instalação	✓ Altos custos de investimento, operação e manutenção
✓ Ausência relativa de ruídos e odores	✓ Altos custos para tratamento de gases
✓ Menores distâncias entre geração e destinação; redução das emissões de veículos e impacto positivo sobre o tráfego local	✓ Possível necessidade de equipamento e combustível auxiliar
✓ Menores emissões de gases de efeito estufa	✓ Dificuldade com resíduos de baixo poder calorífico, altos teores de cloro ou muito úmidos
✓ Geração de empregos	✓ Possível incompatibilidade com outros sistemas
✓ Recuperação de energia	✓ Necessidade de mão de obra especializada
✓ Possibilidade de redução do consumo de combustíveis fósseis	✓ Maiores dificuldades operacionais
✓ Destruição térmica de bactérias, vírus e outros organismos patógenos	

Fonte: MENEZES; MENEZES; GERLACH, 2001; HENRIQUES, 2004; DIAS, 2006 ; PAVAN, 2010; PARO; COSTA; COELHO, 2008; MONNI, 2012; CLEARY, 2009; ASSOMOI; LAWRYSHYN, 2012; CHERUBINI; BARGIGLI; ULGIATI, 2009; WITTMAYER; SAWILLA, 2009; THANH; MATSUI, 2013; JESWANI; SMITH; AZAPAGIC, 2013; ASTRUP et al. (2015).

O processo de incineração de RSU é responsável pela redução drástica do volume de resíduos a ser depositado em aterros sanitários, estando essa redução na faixa de 70% a 90%, dependendo da metodologia de avaliação. Além dessa redução no volume de resíduos, as plantas de incineração não necessitam de grandes áreas para instalação e operação, o que faz com que o processo seja uma ótima solução para municípios de grande porte com restrições de áreas, já que aterros sanitários necessitam de uma quantidade de área bem maior para serem instalados (PAVAN, 2010).

Menezes, Menezes e Gerlach (2001) apontam, após criteriosa análise de impacto ambiental do processo de incineração em relação ao aterro sanitário, diversos pontos positivos à incineração. Dentre eles, encontra-se a redução nas distâncias a serem percorridas por caminhões para levar os resíduos aos aterros, que se localizam cada vez mais

distantes dos centros urbanos, o que reduziria as emissões dos veículos e teria impacto positivo sobre o tráfego local. Os autores citam também a redução da contaminação dos lençóis freáticos e mananciais subterrâneos, consequência da má operação de alguns aterros, e a redução de problemas de higiene e de saúde, decorrentes da possível presença de vetores nos aterros.

Henriques (2004) destaca a ausência relativa de ruídos e odores como vantagem da incineração, mas também ressalta a dificuldade do processo em relação aos resíduos com muita umidade ou baixo poder calorífico, que podem prejudicar a combustão. Menciona, ainda, a barreira enfrentada na combustão de resíduos com alto teor de cloro, que pode acarretar na formação de dioxinas e furanos, devendo, portanto, serem tratados antes de sua combustão. Essas desvantagens, no entanto, podem ser contornadas, na medida em que se investe não só no tratamento dos efluentes da incineração, mas na melhoria do processo, através de técnicas de pré-tratamento dos resíduos antes de sua queima.

A instalação de uma planta de recuperação energética de RSU pode gerar importantes oportunidades de emprego na região, devido à necessidade de postos de trabalho para operar o incinerador, o que pode tornar o processo mais suscetível à aceitação da população local. Nessa perspectiva, Pavan (2010) afirma que o treinamento de profissionais para a operação e manutenção dos equipamentos possibilita a abertura de um mercado nacional propício ao estabelecimento de fabricantes de equipamentos no Brasil.

Conforme discutido neste trabalho, a recuperação de energia durante a combustão é uma das principais vantagens desse processo. Nesta sequência, Paro, Costa e Coelho (2008) afirmam que, enquanto um aterro sanitário leva sessenta anos para aproveitar todo o seu potencial energético, uma usina de incineração o faz em vinte anos, reduzindo instantaneamente todo o RSU disponibilizado. Além disso, ressaltam que o aterro não converte todo o poder calorífico do RSU, apenas do biogás dele resultante, o que faz com que o resíduo remanescente, após a vida útil do aterro, tenha ainda algum poder calorífico, e grande parte do carbono presente no RSU fique fixado no solo.

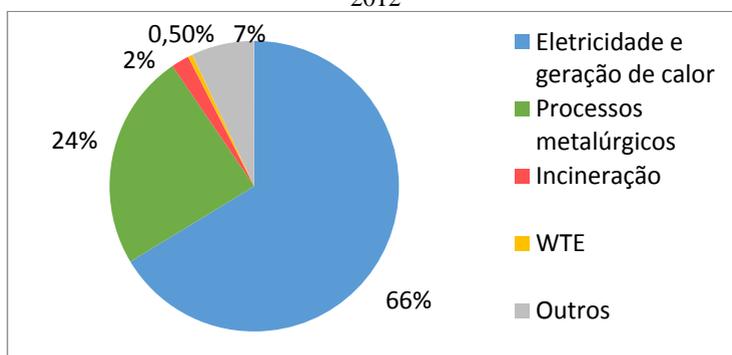
Muito se discute acerca das reais vantagens do processo de recuperação energética dos RSU no hemisfério sul, visto que a energia gerada nesse é largamente aplicada, no hemisfério norte, para o aquecimento de ambientes, utilidade essa não atrativa para as condições climáticas do sul. No entanto, em análise de vinte e nove (29) estudos sobre plantas WTE, Astrup et al. (2015) demonstram que apenas 10%

dessas plantas utilizam a energia resultante de seu processo de combustão para a geração de calor, enquanto 40% delas utilizam essa energia para cogeração de calor e eletricidade e 35% são destinadas apenas para geração de eletricidade, fator que comprova a viabilidade de aproveitamento dessa energia recuperada dos RSU para outros fins.

No que tange às emissões resultantes do processo de incineração, discutiu-se, no capítulo referente à fundamentação teórica deste trabalho, os avanços das tecnologias de depuração de gases, que hoje permitem emissões abaixo dos limites estabelecidos por normas bastante restritivas. No contexto europeu, a Diretiva 2010/75/EU impõe padrões de emissões muito rígidos para os processos de incineração, exigindo o encerramento das instalações que não atenderem a esses parâmetros, o que tem garantido o caráter não poluente do processo (CMS, 2013).

Um aspecto muito polêmico sobre o processo de incineração são as emissões de dioxinas e furanos. Dwyer e Themelis (2012), em análise das emissões anuais de dioxinas dos Estados Unidos entre os anos de 1987 e 2012, constataram que as emissões de dioxinas provenientes de WTE, no país, correspondem apenas a 0,5% das emissões totais de todas as fontes controladas, e 0,1% se forem consideradas ambas as fontes controladas e não controladas. Em seu estudo, ainda apresentam a baixa representatividade das WTE na emissão total de dioxinas quando comparadas com outras fontes emissoras dessas substâncias, conforme Figura 9.

Figura 9 - Distribuição das fontes controladas de emissão de dioxinas nos EUA, 2012



Fonte: Adaptado de Dwyer e Themelis, 2012.

Bolognesi (2012), em estudo comparativo entre tecnologias de tratamento de RSU, constata que a emissão dessas substâncias, em uma

usina de incineração com sofisticado tratamento de gases, pode ser vinte e cinco (25) vezes inferior às emissões de um aterro sanitário com queima de biogás.

Não se sabe ao certo qual o real risco que as dioxinas podem oferecer à saúde, porém muito se discute a respeito de seu potencial cancerígeno. Roberts e Chen (2006), em análise do risco que a incineração representa à saúde, estimam que esse potencial cancerígeno é menor do que o que se acredita. Em seu estudo, demonstram que, durante vinte e cinco (25) anos de operação de um incinerador, existe a probabilidade de 1,8% de haver um caso de câncer fatal a mais do que o número existente no cenário em que este incinerador se encontra ausente. No que tange aos materiais particulados (MP), mostram que, nesses anos de operação, há 2% de chance risco de óbito por causa do MP, em adição aos 236 casos de óbito que haveria em decorrência do MP emitido por outras fontes, principalmente pelas emissões de veículos. Do mesmo modo, Aranda (2001 apud DIAS, 2006) relacionou o risco de câncer a partir de diferentes exposições, dentre elas as emissões em plantas de incineração, de forma a demonstrar o real potencial cancerígeno dessas substâncias (Tabela 1).

Tabela 1 - Risco de câncer a partir de diferentes exposições

Chance por milhão	Atividade
5000	Exposição média a radiação em casas (fontes domésticas)
4640	Resíduo de pesticidas em comida fresca
250	Consumo de pasta de amendoim por crianças, devido à aflatoxina
180	Níveis aceitáveis de benzeno
20	Média de submissão aos raios-X num diagnóstico
18	Inalação das emissões de benzeno e cloreto de vinila de um aterro de 150 ton/dia
11	Exposição a dioxinas e furanos de lixo não incinerado
2,4	Consumo e uso para banho de água clorada
0,07	Emissão de dioxinas e furanos em uma planta de incineração de 1500 ton/dia

Fonte: Adaptado de ARANDA, 2001 apud DIAS, 2006.

Em relação aos gases responsáveis pelo efeito estufa (GEE), diversos estudos realizados recentemente, através da ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV), compararam diferentes cenários e chegaram à conclusão que, principalmente em termos de contribuição ao aquecimento global e emissões de GEE, os cenários que envolvem o

processos de incineração com recuperação energética apresentam-se ambientalmente mais favoráveis do que aqueles com aterros sanitários. Estes, por sua vez, aparecem em todos os estudos analisados como a pior opção para o gerenciamento dos RSU. (MONNI, 2012; CLEARY, 2009; ASSOMOI; LAWRYSHYN, 2012; CHERUBINI; BARGIGLI; ULGIATI, 2009; WITTMAYER; SAWILLA, 2009; THANH; MATSUI, 2013; JESWANI; SMITH; AZAPAGIC, 2013). Embora a incineração emita grandes quantidades de gás carbônico (CO_2), os aterros geram quantidades também elevadas de metano (CH_4), gás muito mais prejudicial ao efeito estufa.

A conclusão que os estudos recentes têm apresentado, de forma geral, é que a destinação de RSU em aterros sanitários não se configura mais como uma alternativa coerente com as diretrizes atuais acerca das emissões de GEE em âmbito global, visto as emissões desses gases, em aterros, serem maiores que nas alternativas apresentadas. Astrup et al. (2015), após comparação de vinte e nove (29) diferentes estudos, apresentam o aterro sanitário como pior opção para o gerenciamento de RSU. Os cenários analisados que envolvem o tratamento térmico não só apresentaram menores emissões de gases de efeito estufa, como também menores potenciais de acidificação e eutrofização do meio ambiente.

Na busca de um caso mais prático e aplicável ao contexto nacional, Mendes, Aramaki e Hanaki (2004), ao realizarem ACV de possíveis cenários de gerenciamento de RSU em São Paulo, concluíram que a situação analisada (aterro sanitário) apresentava o maior impacto ao meio ambiente, enquanto um cenário que envolvesse o processo de incineração no tratamento térmico dos resíduos, apresentaria a possibilidade de redução dos impactos ambientais gerais, além de permitir a recuperação energética.

A respeito dos altos custos apontados para o processo de incineração, apesar de esse requisitar um investimento inicial muito superior a um aterro sanitário, Paro, Costa e Coelho (2008) ressaltam que a opção elimina quase que imediatamente o RSU, o que representa uma redução do passivo em resíduos que um aterro sanitário apresenta, já que esse exige cuidados por até quarenta anos após seu encerramento. Nesse sentido, Assamoi e Lawryshyn (2012) afirmam que, apesar de o processo de incineração realmente requerer altos custos, a alternativa do aterro sanitário só é vantajosa financeiramente durante um breve período de tempo, pois essas unidades têm prazo de vida útil muito mais curto que os processos de tratamento térmico. Sendo assim, ressaltam que os custos relacionados ao encerramento dos aterros, tratamento da área degradada e instalação de novo aterro devem ser considerados quando

se compara as duas tecnologias.

No que toca o receio que muitas pessoas têm de que a presença de uma usina de incineração de RSU vá desencorajar, e até mesmo inibir o processo de reciclagem, percebe-se que existe a possibilidade da coexistência dessas duas alternativas. Como se pode perceber na Figura 4 apresentada anteriormente na página 29 deste trabalho, os países com maiores taxas de valorização energética possuem também grandes taxas de valorização material. Esses dados não só demonstram que a incineração não constitui um freio ao processo de reciclagem, como também indicam que existem taxas de reciclagem maiores em locais onde há a prática da incineração.

Vale ressaltar também que, apesar da reciclagem ter diversas vantagens, conforme discutido neste trabalho, e normalmente ser a melhor opção para o resíduo, existem alguns materiais para os quais a alternativa não é vantajosa, seja em termos econômicos ou devido a dificuldades enfrentadas pelo processo. Assim sendo, prova-se a necessidade da existência de outras formas de tratamento, ainda que existam bons níveis de reciclagem (TYSKENG; FINNVEDEN, 2010).

Percebe-se, a despeito da imagem negativa que se difundiu do processo de incineração, que quanto mais se recicla os resíduos, mais a incineração se prova como melhor solução para os rejeitos, o que torna o processo um aliado da reciclagem dentro de um sistema de gerenciamento integrado de RSU. Na Holanda, por exemplo, que em 2010 atingiu sua meta para o ano de 2020 de reciclar 50% de seus resíduos, verifica-se que a incineração é responsável pelo tratamento de cerca de 30% do total de resíduos gerados, o que comprova, mais uma vez, a possibilidade da coexistência desses dois processos (EEA, 2013).

2.7 Recuperação Energética de RSU através da Incineração

O Brasil dispõe, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2015, de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável. As diferentes fontes renováveis representam 74,6% da oferta interna de eletricidade no país, sendo ainda prevista uma expansão da geração de energia elétrica a partir de outras formas de geração que não a hidráulica, que responde, hoje, por 65% da oferta interna de energia (EPE, 2015).

Nesse contexto, a recuperação energética de RSU surge como uma alternativa na oferta de energia elétrica. O aproveitamento do teor energético contido nos RSU não consiste apenas na utilização desses como combustível em processos de incineração, podendo também ser

empregado através de processos de reciclagem, compostagem e recuperação do biogás gerado em aterros sanitários.

Em análise contida no Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007), dentre as formas de geração de energia a partir dos RSU, o processo de incineração tem maior potencial de recuperação energética do que a recuperação de biogás de aterros, apresentando potencial de geração de 5.280 MW até o ano de 2030.

A recuperação energética dos RSU através da incineração, conhecida em inglês pelo termo *Waste to Energy* (WTE), mostra-se muito promissora, uma vez que se trata não só de uma solução para o gerenciamento dos RSU mas também um processo em que se obtém energia elétrica e/ou energia térmica como produto (SANTOS, 2011).

Para Murphy (2004 apud LEME, 2010), a expressão *Waste to Energy* descreve, em geral, uma série de processos em que um subproduto útil (energia) é recuperado a partir de resíduos, fonte de energia aparentemente inutilizável. A chamada *energia do lixo*, resume Leme (2010), é, portanto, uma maneira de se recuperar a energia que seria desperdiçada nos resíduos.

Existem diversos métodos de produção de energia a partir dos RSU, sendo a incineração direta dos resíduos com uso do calor gerado em um ciclo Rankine a vapor a mais difundida mundialmente. (LEME, 2010). No entanto, Santos (2011) ressalta que o processo de incineração só se torna uma opção viável através da utilização da Melhor Tecnologia Disponível no controle das emissões geradas (do inglês, *Best Available Technology*), que consiste em equipamentos e tecnologias avançadas específicas para reduzir ao máximo os poluentes presentes nos gases da combustão.

O processo de incineração já sofreu diversas modificações ao longo dos anos, tendo assumido algumas vezes o papel de vilão prejudicial ao meio ambiente. Após ter sido mal visto por um determinado tempo, os interesses na incineração e em outras tecnologias WTE foram renovados nos EUA e no Canadá, por exemplo. Após um período de recessão nos Estados Unidos, em 2004, a incineração foi qualificada como atividade geradora de energia renovável (PSOMOPOLUS, 2009). Atualmente, projetos para aumentar a capacidade das plantas existentes encontram-se em andamento, enquanto os governos municipais avaliam a opção de construção de novas plantas de incineração de forma a reduzir a disposição de RSU em aterros sanitários (SANTOS, 2011).

A Europa também é exemplo da utilização em larga escala do processo de incineração de RSU para recuperação de energia. No ano de

2012, de acordo com dados da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA – *International Solid Waste Association*) (ISWA, 2012), existiam 455 plantas WTE em funcionamento, distribuídas em 18 países.

A partir da pesquisa realizada neste trabalho, verificou-se que não existem experiências comerciais em grande escala do processo de incineração com recuperação energética no Brasil para que se possa tomar por exemplo. Até o presente, as unidades de incineração existentes se restringem ao processamento de resíduos perigosos e de alto risco, industriais, hospitalares e aeroportuários apenas para redução dos riscos que esses podem oferecer, sem o propósito da reciclagem da energia contida nesses resíduos. O único caso brasileiro de incineração de RSU para geração de energia é uma planta piloto, da empresa USINAVERDE, localizada no campus da UFRJ, no Rio de Janeiro (LEME, 2010).

Poletto (2011) estima que o Brasil poderia gerar uma receita de R\$ 9 bilhões por ano a partir do aproveitamento da energia gerada no processo de incineração, caso esse fizesse parte do gerenciamento dos RSU do país. No entanto, Santos (2011) explica que, apesar de nos encontrarmos em um momento onde o aproveitamento energético através da incineração dos RSU se mostra uma solução viável não só para a destinação dos RSU, mas também para a diversificação das formas de geração de energia, existem alguns fatores que fazem com que essa ainda não seja uma realidade no Brasil.

3 METODOLOGIA

Com vistas a construir o cenário estudado neste trabalho, elaborou-se, de antemão, um panorama da gestão dos RSU no município de Florianópolis, abrangendo dados quantitativos de geração e tratamento e informações acerca do gerenciamento atual desses resíduos. Estes dados foram compilados a partir das informações obtidas junto à Companhia de Melhoramentos da Capital (Comcap), empresa responsável pelo gerenciamento dos RSU do município.

Para atingir o principal objetivo deste estudo e alcançar uma estimativa adequada do potencial energético dos RSU de Florianópolis, calculou-se o poder calorífico inferior (PCI) desses resíduos, com base em equações e dados da literatura e utilizando-se de valores de caracterização dos RSU gerados no município. Essa caracterização, ilustrada através da composição gravimétrica dos resíduos gerados, faz parte de um documento ainda em elaboração da Prefeitura Municipal, intitulado Plano de Coleta Seletiva de Florianópolis, cujo estudo foi realizado pela empresa Ampla Consultoria e Planejamento.

É de suma importância ressaltar que, para estimar o potencial energético dos RSU, considerou-se como insumo do processo apenas os resíduos tidos por rejeitos, ou seja, que hoje seriam dispostos em aterros sanitários para deterioração. Para este trabalho, entende-se por rejeito apenas aquele resíduo que não pôde ser reciclado, garantindo assim, o processo de reciclagem como etapa anterior ao tratamento térmico do resíduo para geração de energia.

Dessa forma, sugere-se o processo de incineração com recuperação energética como técnica de tratamento dos RSU de Florianópolis. Para a análise da aplicabilidade dessa técnica, efetuou-se uma revisão da literatura acerca do processo produtivo de um incinerador com cogeração de energia, das vantagens e desvantagens da incineração e das formas de obtenção de energia elétrica através da incineração.

O principal objetivo dessa revisão, além de fundamentar este trabalho e estudar a conceituação necessária para o tema, foi obter uma análise crítica do processo de incineração, que englobasse tanto a visão e o estudo daqueles que são a favor da utilização do processo, quanto daqueles que apresentam argumentos contrários, procurando compreender a origem destes argumentos e verificar sua aplicabilidade no contexto estudado.

Por fim, devido à extrema importância que o tratamento dos gases e efluentes gerados no processo de incineração apresenta, foi

realizado um levantamento das tecnologias disponíveis de tratamento, verificando sua eficiência e cumprimento da legislação, com o objetivo de tornar viável a implementação de um processo que esteja de acordo com as leis vigentes de lançamento de efluentes gasosos, não causando maiores danos ao meio ambiente.

3.1 Panorama dos RSU em Florianópolis

O município de Florianópolis é constituído por uma parte insular e uma parte continental, ligadas por duas pontes que têm seus fluxos viários em sentidos contrários, compreendendo uma área, segundo o Censo do IBGE de 2010, de 451 km².

Quanto a aspectos populacionais, estima-se que, neste ano de 2015, Florianópolis possua 469.690 habitantes, sendo a maioria residente em área urbana (96,2%) (IBGE, 2010). Além da população residente, Florianópolis recebe diariamente pessoas que residem em municípios vizinhos, porém trabalham nesse município, caracterizando a chamada população pendular, que tem interferência significativa nas demandas da cidade, dentre elas, o manejo de resíduos sólidos.

Segundo pesquisas realizadas pelo IBGE, a população total do município de Florianópolis tem aumentado de forma acentuada nos últimos anos, apresentando um crescimento de 23% no período entre 2000 e 2010. Paralelo a esse crescimento, percebe-se também um aumento de 47%, no mesmo período, da geração de resíduos sólidos no município, o que configura uma elevação na taxa de geração per capita anual de 21%, passando de 0,33 ton/hab.ano, em 2000, para 0,40 ton/hab.ano em 2010, segundo dados da Comcap (2011).

A gestão dos RSU e dos serviços de limpeza pública no município de Florianópolis é de competência da Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento - SMHS, sendo os serviços concedidos para a Companhia de Melhoramentos da Capital – Comcap, empresa de economia mista municipal. Em outras palavras, a SMHS é o órgão responsável pela gestão dos RSU, enquanto a Comcap é responsável pelo seu gerenciamento. Entre os serviços de manejo de resíduos prestados pela Comcap, encontra-se a coleta convencional e seletiva, a remoção de entulhos e lixo pesado, serviços de varrição, roçagem e capina, limpeza de determinados tipos de eventos e programas de educação ambiental (COMCAP, 2014).

A coleta convencional dos RSU do município alcança 98% dos moradores na modalidade porta a porta, enquanto que para os 2% restantes, a coleta é efetuada através de lixeiras comunitárias em que a

população deposita seus resíduos, devido à dificuldade de acesso de sua localização para os caminhões coletores, como locais com escadas ou morros íngremes. Dessa forma, a coleta convencional de resíduos sólidos abrange 100% da população municipal. A coleta seletiva implantada, apesar de atingir 92% da população (70% atendida pelo método porta a porta e o restante, por depósitos comunitários), recolhe apenas uma quantidade de material reciclável correspondente a cerca de 5% do RSU total (COMCAP, 2013). Salienta-se que, caso o montante coletado de recicláveis fosse ampliado, não haveria infraestrutura suficiente para garantir a capacidade de beneficiamento desses materiais, visto que as estruturas atuais existentes já apresentam dificuldades em lidar com todo o material reciclável que chega até elas (ICES, 2015).

Em síntese, todos os resíduos recolhidos pela Comcap são encaminhados ao Centro de Transferência de Resíduos Sólidos – CTReS, localizado no bairro Itacorubi, onde são pesados e enviados à destinação final adequada. Os resíduos sólidos misturados e rejeitos da triagem da coleta seletiva são encaminhados ao aterro sanitário de Biguaçu, operado pela empresa Proactiva, enquanto os resíduos provenientes da coleta seletiva são encaminhados às Associações de Catadores de Materiais Recicláveis e outros parceiros.

Por fim, vale ressaltar que, de acordo com o Plano de Metas relativo às ações da Comcap, objetiva-se aumentar para 20% o percentual de resíduos desviados do aterro sanitário através de práticas de reciclagem até o final do ano de 2015, 40% até o ano de 2020 e 60% até 2030, indo ao encontro dos objetivos e metas estabelecidos pela PNRS.

3.1.1 Composição Gravimétrica dos RSU em Florianópolis

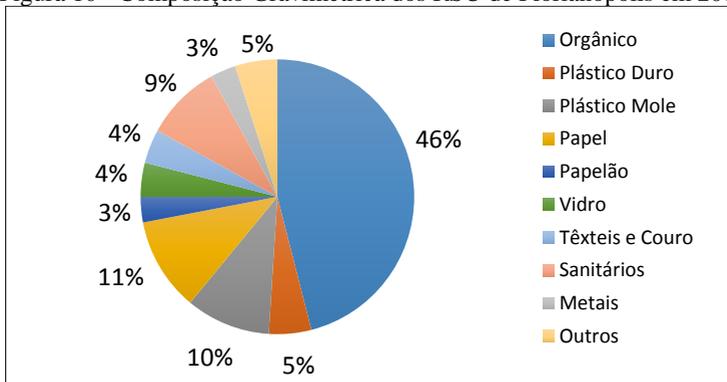
Neste item, apresenta-se a composição gravimétrica dos RSU gerados no município de Florianópolis. A variação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos é de extrema importância para este estudo, pois são essas mudanças de composição dos resíduos que determinam o potencial de energia contido neles, independente da forma com que essa energia será gerada posteriormente. Esses parâmetros determinam a quantidade de energia possível de ser recuperada a partir dos RSU (ASSAMOI; LAWRYSHYN, 2012).

O estudo recente mais completo acerca da caracterização dos RSU no município é datado do ano de 2002 (Figura 10), o que não caracteriza, de fato, a produção de resíduos atual, haja vista a evolução

da população e as possíveis mudanças de hábitos experimentadas nestes treze anos. Existe, hoje, um levantamento preliminar de dados de composição gravimétrica dos RSU de Florianópolis mais atual, realizado em 2014 pela empresa Ampla Consultoria e Planejamento, que faz parte de um documento ainda em elaboração pela Prefeitura Municipal de Florianópolis: o Plano Municipal de Coleta Seletiva. Apesar de esse estudo ter se utilizado de um procedimento de amostragem mais simplificado, contando com quatro (04) amostras e correndo o risco de não ser tão representativo quanto a caracterização de 2002, que contou com cento e vinte (120) amostras, optou-se por aplicar, neste trabalho, os valores ali obtidos por serem dados mais atuais da produção de resíduos no município.

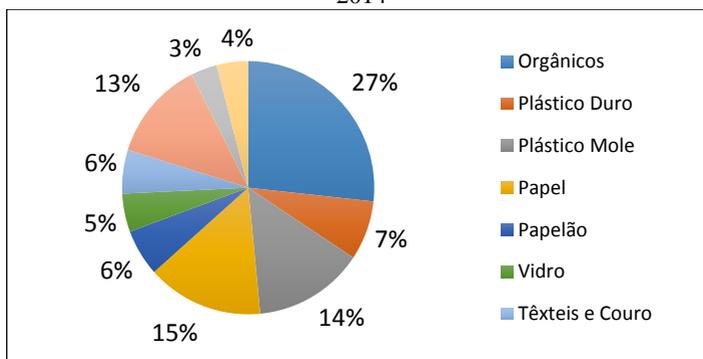
O procedimento de caracterização dos RSU de Florianópolis, realizado pela Ampla Consultoria e Planejamento, consistiu, portanto, em uma análise de quatro amostras dos resíduos coletados pela Comcap, tendo duas sido realizadas com resíduos da coleta convencional, e outras duas da coleta seletiva. O procedimento de amostragem foi realizado através do método de quarteamento especificado pela NBR 10.007/2004. Para a definição da gravimetria dos resíduos foram somados os pesos estimados para cada material das coletas convencional e seletiva (PMF, 2014). Os resultados da composição gravimétrica obtidos por essa análise, que serão utilizados para os cálculos deste trabalho, são apresentados na Figura 11.

Figura 10 - Composição Gravimétrica dos RSU de Florianópolis em 2002



Fonte: Adaptado de COMCAP, 2002.

Figura 11 - Composição Gravimétrica Preliminar dos RSU de Florianópolis em 2014



Fonte: Adaptado de PMF, 2014.

3.2 Tratamento dos dados

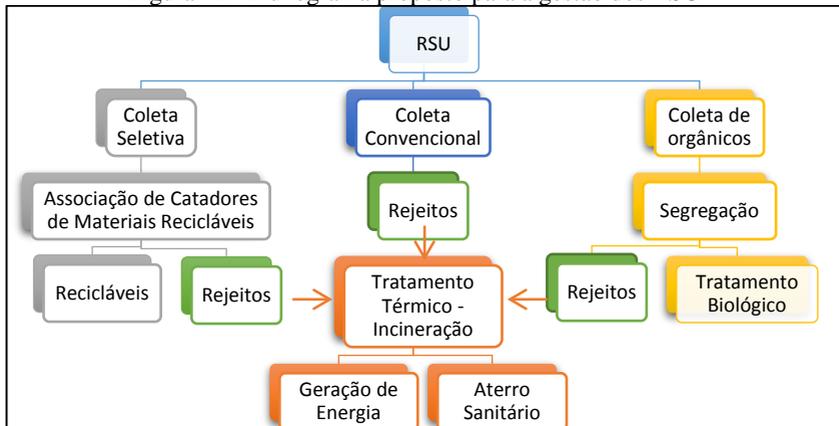
Com base nessa caracterização, especificou-se os tipos de resíduos que poderiam servir como matéria-prima para o processo de incineração, obtendo-se, assim, uma quantidade total de resíduos produzidos em 2014 com potencial para serem usados como combustível. Estes resíduos são filtrados, neste trabalho, como aqueles que possuem potencial calorífico e que não apresentam vantagens significativas em sua reciclagem, sendo hoje descartados no município como rejeitos. Dessa forma, pretende-se mostrar a possibilidade de incentivar a reciclagem dos materiais paralelamente à aplicação do processo de incineração àqueles que não forem aproveitados na reciclagem. A Figura 12 a seguir exemplifica, através de um fluxograma, a forma como é proposta a diferenciação e seleção dos resíduos passíveis de serem incinerados, sendo definidos, na figura, pelos rejeitos das formas de coleta dos RSU.

Sendo assim, conforme esquematizado na Figura 12, os resíduos sólidos urbanos gerados teriam três opções de coleta: a coleta seletiva, para onde iriam os materiais secos, passíveis de reciclagem; a coleta de resíduos orgânicos, que seria destinada apenas aos materiais de origem vegetal ou animal para posterior tratamento biológico; e a coleta convencional, que seria aplicada aos resíduos que não se encaixassem nas opções anteriores. Apenas os rejeitos desses processos serviria de matéria prima para o tratamento térmico. Como não foi estabelecida ainda, no município, uma coleta diferenciada para os resíduos orgânicos,

esses foram considerados, neste trabalho, como parte dos resíduos da coleta convencional.

A proposta deste trabalho consiste no tratamento térmico desses rejeitos através do processo de incineração com recuperação energética, tendo como produto a geração de energia e um volume reduzido de resíduos enviados ao aterro sanitário.

Figura 12 - Fluxograma proposto para a gestão dos RSU



Fonte: Elaboração própria.

A diferenciação entre resíduo reciclável e rejeito, dentre os resíduos oriundos da coleta seletiva, foi feita a partir de pesquisa na literatura, assim como através de pesquisas de campo junto às Associações de Catadores de Materiais Recicláveis da região. O principal objetivo das pesquisas de campo é enumerar aqueles resíduos potencialmente recicláveis, que hoje são triados pela população e enviados às Associações, mas que são, no entanto, descartados como rejeito por não possuírem valor econômico ou comprador disponível na região, sendo hoje encaminhados ao Aterro Sanitário.

Segundo as informações coletadas na Associação de Catadores de Materiais Recicláveis mais representativa da região (ACMR), que se localiza no bairro Itacorubi e recebe em torno de 50% de todo o material recolhido pela coleta seletiva da Comcap, alguns dos plásticos que chegam para a triagem são hoje descartados como rejeito por não possuírem mercado comprador na região. Dentre esses materiais, situam-se os plásticos do tipo PS, muito encontrados em copos e pratos descartáveis ou embalagens de macarrão, por exemplo, assim como

alguns materiais produzidos em PET coloridos, embalagens de Catchup em PET e algumas embalagens de garrafas de iogurtes. Tal qual esses tipos de plástico, embalagens plásticas metalizadas (como as encontradas em salgadinhos e biscoitos), materiais adesivos e embalagens sujas ou engorduradas também são descartadas como rejeito e destinadas ao aterro sanitário.

A partir dessas informações selecionou-se, dentre a totalidade de resíduos gerados, aqueles que poderiam servir de combustível ao processo de incineração, de forma a estimar seu potencial energético. Com relação à fração reciclável dos resíduos, excluídos aqueles materiais acima citados, sugere-se seguir a orientação da PNRS e encaminhar esse material para cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis. Ao rejeito desses materiais (cerca de 23%, segundo dados da ACMR) junto aos outros resíduos que possuem potencial calorífico e não são interessantes ao processo de reciclagem, sugere-se a recuperação energética através do processo de incineração.

O resultado dessa seleção é apresentado, em peso e porcentagem do valor total de RSU gerados, na Tabela 2. Observa-se que a quantidade de RSU destinada à incineração corresponde a cerca de 50% do total de RSU gerado. Vale ressaltar que, para a seleção efetuada, não se trabalhou com dados para uma situação futura, apenas do contexto atual.

Tabela 2 – Seleção dos RSU que servirão de combustível

RSU Combustíveis	Peso (kg)	Fração do total (%)
Orgânico	43.803.139	26,74%
Plástico mole	515.253	0,31%
Plástico duro	1.893.782	1,16%
Têxteis e Couro	9.154.701	5,59%
Resíduos Sanitários	20.919.861	12,77%
Madeira	291.066	0,18%
Borracha	991.411	0,61%
Total	77.569.213	47,36%

Fonte: Elaboração própria.

Têm maior interesse, à incineração, frações de RSU que apresentem maior poder calorífico, como plásticos, papel/papelão e borrachas. No entanto, não significa que outras frações de resíduos não apresentem relevância e potencial energético para o processo de queima, conforme exemplificado na sequência deste trabalho. O problema do uso desses materiais como combustíveis para a incineração, é que essa pode resultar em uma possível carga térmica inferior à do projeto de

forno da incineração, implicando no aumento do consumo de combustível auxiliar (FEAM, 2012).

3.3 Cálculos Energéticos

Com base nos resultados obtidos na seleção dos RSU, apresentados anteriormente na Tabela 2, calculou-se o potencial energético desses resíduos, a partir de equações matemáticas que têm por base o PCI da base seca dos RSU, conforme apresentado a seguir:

$$E_d = PCI_{base\ seca} + m_{RSU} \cdot cp_{RSU}(T_{RSU} - 25) + m_{AR} \cdot cp_{AR}(T_{ar} - 25) \quad (1)$$

em que:

E_d = Energia disponível (kJ/kg);

$PCI_{base\ seca}$ = Poder calorífico inferior dos RSU em sua base seca (kJ/kg);

m_{RSU} = massa do RSU (kg/kg)

cp_{RSU} = calor específico do RSU (kJ/kg.°C)

T_{RSU} = Temperatura dos RSU (°C)

m_{ar} = massa do ar (kg/kg)

cp_{ar} = calor específico do ar (kJ/kg.°C)

T_{ar} = Temperatura ambiente

Considerou-se, neste trabalho, a temperatura do ar e dos RSU como 25°C, obtendo-se, assim:

$$E_d = PCI_{base\ seca} \quad (2)$$

O principal objetivo dos cálculos efetuados foi estimar o poder calorífico total da base seca dos resíduos selecionados, considerando, esse, como a energia total disponível para o processo.

3.3.1 Teor de Umidade

A composição gravimétrica dos resíduos de Florianópolis, na qual esse trabalho se baseia, é realizada com base no peso que cada fração de resíduos representa no total gerado. Nesse peso, além do material propriamente dito, está contido também um percentual de água, ou seja, a umidade que cada tipo de material carrega em sua composição. Esse teor de umidade é específico para cada tipo de material, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Umidade presente nos componentes dos RSU

Componente	Umidade (%)
Orgânico	66
Plástico	17
Papel/Papelão	21
Têxteis e Couro	36
Resíduos Sanitários¹	62
Madeira	25
Borracha	5

Fonte: Adaptado de CODESC (2003) apud FEAM (2012); ENGEBIO; BURGEAP, 2003 apud ENGEBIO, 2010; SOARES, 2011.

¹Por falta de outras fontes, adotou-se a umidade dos resíduos sanitários como a umidade encontrada nas amostras de fraldas no trabalho de SOARES, 2011.

Percebe-se que a fração orgânica dos resíduos é a parcela que contém o maior teor de umidade dos materiais listados, o que contribui para a redução do potencial energético do processo. Um alto teor de umidade resulta em menor quantidade de energia útil liberada, uma vez que a água absorve o calor em seu processo de vaporização, não contribuindo para o aumento de temperatura no processo. Dessa forma, quanto maior o teor de umidade de um material, menor será o seu PCI.

3.3.2 Poder Calorífico Inferior

Poder calorífico é a quantidade de energia capaz de ser liberada por unidade de massa de um material em combustão ou oxidação. Essa característica, para o caso do RSU, é função da composição dos resíduos e sua umidade inerente (LEME, 2010). O poder calorífico pode ser superior ou inferior, sendo o poder calorífico inferior (PCI) a energia liberada na forma de calor, enquanto o poder calorífico superior (PCS) é a soma dessa energia com a energia gasta na vaporização da água formada na reação (ENGEBIO, 2010).

Paro, Costa e Coelho (2008), após extensa análise na literatura, verificaram que ocorrem grandes variações na composição dos RSU, o que dificulta o estabelecimento de valores de PCI dos resíduos. Essas variações, para Pavan (2010), têm influência direta na eficiência do processo de incineração dos RSU, e estão diretamente relacionadas ao nível de desenvolvimento econômico da fonte geradora.

A composição dos resíduos determina o PCI equivalente que servirá como combustível do processo, valor esse dependente do PCI de cada resíduo que compõe a massa a ser incinerada (PAVAN, 2010).

Sendo assim, neste trabalho, estimou-se o PCI equivalente com base nos valores de PCI de base seca de cada componente dos RSU encontrados na literatura (Tabela 4).

Tabela 4 – PCI dos componentes de RSU (base seca)

Componente	PCI(base seca) (kJ/kg)
Orgânico	18.003
Plástico	43.124
Papel/Papelão	15.910
Têxteis e Couro	17.585
Resíduos Sanitários	15.910
Madeira	15.491
Vidro	0
Metal	0
Outros	0

Fonte: Adaptado de ENGEBIO, 2010 e FEAM, 2012.

3.3.3 Estimativa do potencial energético

Conforme demonstrado anteriormente, a energia disponível nos RSU é numericamente equivalente ao PCI equivalente da base seca dos resíduos, de acordo com a equação 2 apresentada.

$$Ed = PCI_{base\ seca} \quad (2)$$

Para estimar o potencial energético total dos RSU de Florianópolis foi preciso retirar a massa correspondente à fração de água presente nos resíduos. Para tal, utilizou-se dos teores de umidade disponíveis na literatura, retirando-se esse percentual da massa total de cada componente de resíduo, conforme equações apresentadas a seguir.

$$Massa\ Total\ Seca = (1 - \omega)(Massa\ total) \quad (3)$$

$$fm_{seca} = fm_{úmida}(1 - \omega) \quad (4)$$

onde:

ω = teor de umidade (%)

fm = Fração mássica (%)

Obteve-se, dessa forma, as frações mássicas na base seca de cada componente (Tabela 5). Aplicando-se a equação 3, encontrou-se a massa total seca de RSU. Paralelamente, através do emprego da equação 4, obteve-se o percentual de fração mássica referente à base seca dos resíduos.

Tabela 5 – Transformação dos RSU: Base Úmida para Base Seca

Componente	Base Úmida			Base Seca		
	Massa total (ton)	fm %	ω %	Massa Total Seca (ton)	fm B.U. ³ (%)	fm B.S. ⁴ (%)
Orgânico	43.803,1	26,7	66%	14.893,1	9,2	12,8
Plástico Mole	515,2	0,3	17%	427,7	0,3	0,4
Plástico Duro	1.893,8	1,2	17%	1.571,8	1,0	1,3
Têxteis	9.154,7	5,6	36%	5.859,0	3,6	5,0
Sanitários	20.919,9	12,8	62%	7.970,5	4,9	6,8
Madeira	291,1	0,2	25%	218,3	0,1	0,2
Borracha	991,4	0,6	5%	941,8	0,6	0,8
Outros	18.804.703,0	52,4	0%	18.804.703,0	52,4	72,8
Total	96.373.916,0	100,0	-	-	71,9	100,0

Fonte: Elaboração própria.

² fm B.U. = Fração mássica em relação à base úmida dos RSU

³ fm B.S. = Fração mássica em relação à base seca dos RSU

A partir dos valores encontrados para as frações mássicas da base seca dos RSU, e de seus respectivos valores de PCI, calculou-se o PCI equivalente dos RSU de Florianópolis (Tabela 6).

Tabela 6 – Estimativa do PCI equivalente dos RSU de Florianópolis

Componente	Fm B.S. (kg/kg)	PCI (kJ/kg)	PCI.fm (kJ/kg)
Orgânico	0,128	18.003	2.297,4
Plástico Mole	0,004	43.124	154,2
Plástico Duro	0,013	43.124	577,2
Têxteis	0,050	17.585	874,5
Sanitários	0,068	15.910	1.076,0
Madeira	0,002	15.491	29,1
Borracha	0,008	40.612	327,2
RSU			5.335,6

Fonte: Elaboração própria.

A energia total disponível nos RSU é, portanto, 5.336,6 kJ/kg de resíduo. Adotou-se, para os cálculos aqui efetuados, a queima dos resíduos em uma caldeira com o propósito de gerar vapor superaquecido

para uso em ciclo de Rankine com rendimento global de 30%. Dessa forma, a energia líquida do processo deverá corresponder a, aproximadamente, 1.600 kJ/kg de resíduo, conforme cálculo demonstrado através da equação 5.

$$Ee = \eta_{ciclo} \times Ed \quad (5)$$

onde:

Ee = Energia elétrica produzida no processo (kJ/kg)

η_{ciclo} = eficiência adotada para o ciclo de Rankine (%)

Ed = Energia disponível para o processo (kJ/kg)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se estimar o potencial energético contido nos resíduos sólidos urbanos gerados no município de Florianópolis, definidos, aqui, pelos resíduos domiciliares. A partir dessa quantidade potencial de energia, avalia-se, neste estudo, a possibilidade de implantação do processo de incineração com recuperação energética como técnica de tratamento de RSU anterior à etapa de disposição final de resíduos em aterro sanitário.

Percebeu-se, após análise na literatura, que diversas pesquisas vêm sendo realizadas neste âmbito nos últimos anos, inclusive em nível nacional, o que caracteriza uma possível mudança do paradigma clássico aplicado à gestão de RSU no Brasil: a disposição final em aterro sanitário, sem tratamento prévio, como solução ideal ao gerenciamento dos resíduos.

Os aterros sanitários foram desenvolvidos, inicialmente, para resolver os principais problemas decorrentes da disposição final inadequada em lixões a céu aberto, como a proliferação de vetores e doenças, a presença de pessoas trabalhando nesses lixões e os riscos consequentes dessas atividades. No entanto, ao analisar a disposição em aterro sob uma esfera mais ampla, percebe-se que a solução caracteriza-se como uma medida apenas paliativa, que resolve o problema a curto prazo e mantém toneladas de matéria e energia aterrados longe da vista das pessoas, ao invés de fazer com que retornem ao ciclo produtivo. Além disso, a alternativa causa diversos passivos ambientais que acabam se tornando um fardo incalculável para as gerações futuras, quando estas se tornam responsáveis pelo gerenciamento e recuperação das regiões degradadas após o encerramento dos aterros.

No contexto global atual, em que se discute extensivamente temas como sustentabilidade, aquecimento global e mudanças climáticas, não se pode mais ter o gerenciamento aplicado no Brasil, que mantém como medida única a disposição final em aterro sanitário e pouco investe em técnicas de tratamento de resíduos, como solução ideal. Apresentou-se, neste trabalho, a conclusão de diversos estudos recentes, todos mostrando que, dentre os cenários analisados, a simples disposição final em aterros sanitários (cenário atual de Florianópolis) apresenta-se como a pior opção para o gerenciamento de resíduos, sendo sempre o cenário a apresentar maiores emissões em termos de lançamento de gases contribuintes ao efeito estufa, dentre outros impactos.

É fato que o processo de incineração tem como subproduto gases e substâncias poluentes, que podem oferecer riscos à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, conforme apresentado neste estudo, as tecnologias atuais aplicadas são suficientes para minimizar essas substâncias a um limite considerado seguro para o lançamento na atmosfera. As plantas de incineração atuais instaladas no exterior, conforme apresentado, operam sob as mais rígidas legislações em termos de emissões atmosféricas, o que garante que este processo não ofereça risco e seja, até mesmo, considerado ambientalmente correto.

É de consenso geral que a situação ideal é priorizar o processo de reciclagem em qualquer hierarquia de gestão de RSU, sendo outras formas de tratamento complementares a esse. Encontram-se vantagens e incentivo ao processo em todas as análises estudadas neste trabalho, nas diretrizes de gerenciamento estabelecidas pela PNRS e no próprio senso comum da população. No entanto, demonstrou-se também que, para alguns produtos, a capacidade de reciclagem pode ser limitada, seja pela falta de mercado comprador ou pelas dificuldades enfrentadas pelo processo. A esses produtos deve ser dada uma alternativa de tratamento anterior à sua disposição final, visando aproveitar ao máximo as possibilidades contidas nesses materiais.

Por esses motivos, se faz necessário que sejam revistos os conceitos em relação à incineração dos resíduos no Brasil e outras formas de tratamento, esclarecendo questões técnicas e desmistificando algumas afirmações que possivelmente não estão atualizadas. Durante a execução deste trabalho, foi possível constatar a forte presença de críticas a respeito do processo, fundadas nos antigos dogmas da incineração, que contribuem à construção de posicionamentos equivocados acerca dessa técnica de tratamento, amplamente difundidos no Brasil. Por outro lado, percebe-se o crescimento, ainda que discreto, da quantidade de referências nacionais sobre o tema, que buscam estudar e mostrar informações mais atuais acerca do processo e que não se atêm a esses fundamentos antigos.

Sendo assim, tendo como foco essa mudança de paradigma, apresenta-se os resultados obtidos neste trabalho para a estimativa do potencial energético dos RSU do município de Florianópolis.

4.1 Resultados

Através das equações apresentadas previamente na metodologia deste trabalho, que têm por base o cálculo do PCI da base seca dos RSU de Florianópolis, estimou-se o potencial energético destes resíduos.

Conforme descrito anteriormente, a quantidade total de resíduos que seriam utilizados como combustíveis no processo de incineração corresponde a, aproximadamente, 77.569.213 quilos por ano. Após retirar deste valor a massa referente à umidade presente nestes resíduos (28,1%), aplicando-se a equação 3, tem-se 55.801.407 quilos de RSU produzidos ao ano, ou 1,759 kg/s, conforme demonstram os cálculos:

$$Massa\ Total\ Seca = (1 - \omega)(Massa\ total) \quad (2)$$

$$RSU\ Total_{base\ seca} = (1 - 0,281)(77.569.213)$$

$$RSU\ Total_{base\ seca} = 55.801.407\ kg/ano$$

Dessa forma, com base na energia elétrica produzida através do ciclo de Rankine e na massa total de RSU gerada, na base seca, estimou-se um potencial energético de 2,8 MW, conforme demonstrado:

$$Potencial\ energético = Ee \times RSU_{base\ seca} \quad (6)$$

$$Potencial\ energético = 1.600,7 \times 1,769$$

$$Potencial\ energético = 2.832,32\ kJ/s = 2.832,32\ kW$$

Os resultados intermediários correspondentes a esse raciocínio são resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Estimativa do potencial energético dos RSU de Florianópolis

PCI RSU base seca	5.335,6	kJ/kg
Energia disponível	5.335,6	kJ/kg
Eficiência (η) ciclo	30	%
Energia elétrica	1.600,7	kJ/kg
Massa RSU	77.569.213	kg/ano
Umidade total	0,281	kg/kg
RSU base seca	152.881	kg/dia
Potencial energético	2.832,32	kW
	2,8	MW

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o resultado obtido, após procedimento adequado de reciclagem, o potencial energético dos RSU de Florianópolis seria de 2,8 MW, o que corresponde a 50% da demanda elétrica do campus universitário da UFSC.

Importa destacar que Florianópolis, apesar de ser capital do estado de Santa Catarina, não é considerado um município de grande porte, o que faz com que o valor anual de geração de RSU não seja alto, se comparado com cidades maiores e mais populosas. A experiência atual, de acordo com Menezes, Menezes e Gerlach (2000), sugere que a geração de energia elétrica a partir de RSU se torna rentável em instalações com capacidade de processamento acima de 250 toneladas por dia, sendo que plantas com capacidades inferiores utilizariam a energia apenas para uso próprio. Aplicando esses valores ao caso de Florianópolis, que gera algo em torno de 470 toneladas de RSU por dia (COMCAP, 2014), percebe-se que poderia haver capacidade suficiente para a venda da energia gerada em uma possível planta de incineração com recuperação energética. Esse número, no entanto, ainda poderia ser estimulado com medidas de consórcio em municípios de pequeno e médio porte, por exemplo, possibilitando que resíduos de diferentes localidades fossem tratados em apenas uma unidade, contribuindo não só para uma possível dificuldade relacionada à pouca quantidade de RSU para abastecer o processo, como para os custos do processo. Caixeta (2005) ressalta um ponto a ser destacado nesta continuidade, ao afirmar que o objetivo principal da incineração é o tratamento do RSU, sendo a produção de energia elétrica apenas um subproduto, mas que pode auxiliar a reduzir os custos do processo e da destinação a aterros.

Hoje, no Brasil, a discrepância dos custos de instalação e de operação de ambas as tecnologias são determinantes para a escolha do aterro sanitário como a principal forma de destino de RSU, principalmente porque não existe ainda, no país, uma ferramenta legal que compense essa diferença. Para a aplicação de tecnologias mais sofisticadas de tratamento de RSU em âmbito nacional, muitos autores sugerem a adoção de tarifas de tratamento de resíduos maiores que as praticadas atualmente em aterros sanitários. Mamede (2013) ressalta que a tarifa de tratamento para aterro sanitário praticada no Brasil é baixa se comparada à de países europeus, uma vez que esses elevam os custos de aterramento de forma a estimular práticas alternativas a essa. Pode parecer um absurdo, se analisarmos o contexto financeiro atual do país, sugerir medidas que envolvam o aumento de tarifas, no entanto deve se manter o foco da importância que a gestão adequada dos RSU representa para a população, de todos os benefícios que essa pode

aportar e todos os impactos que deixa de causar ao meio ambiente, o que, por si só, já reduziria gastos consideráveis.

Portanto, dentro do quadro atual de crescimento populacional e consequente aumento da geração de RSU e demanda por energia elétrica, os resultados deste trabalho sinalizaram que existe um potencial, em termos energéticos, para a instalação de uma planta de incineração de RSU com recuperação energética no município de Florianópolis, com as condicionantes de se garantir a preferência ao processo de reciclagem e o tratamento adequado dos efluentes do processo. Além dos resultados numéricos obtidos, verificou-se o caráter vantajoso e atrativo do processo como técnica de tratamento em um sistema de gestão integrada de RSU.

4.2 Considerações Finais

Os maiores desafios encarados na gestão de resíduos sólidos no Brasil são decorrentes de anos de posicionamentos imediatistas, onde sempre se buscou soluções paliativas para remediar os grandes problemas que surgiram ao longo do tempo. Essas soluções evidenciaram o equívoco da autossuficiência, consistindo em medidas isoladas, resolvidas sob a lei do menor custo, que “tapavam buracos” e não contemplavam a questão do resíduo em seu completo ciclo de vida, desde sua geração até destino final. Por esse motivo, o Brasil se encontra, hoje, carente de um planejamento eficaz e unificado no que tange à gestão dos resíduos sólidos.

As soluções mundialmente mais adotadas, que têm gerado os resultados mais eficazes, baseiam-se no conceito de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos que, conforme apresentado neste trabalho, consiste na combinação de várias técnicas para o manejo dos diferentes elementos do fluxo de resíduos. O importante é que fique claro que não existe uma solução ideal que possa ser aplicada sem distinção, e nenhuma tecnologia pode ser concebida isoladamente. Não se pode afirmar, por exemplo, que a prática do aterro sanitário é totalmente errada e que incinerar é o correto, ou vice-versa. A solução ideal para a gestão dos resíduos se constrói a partir da percepção de que, para extrair a capacidade máxima de determinadas tecnologias, essas devem ser operadas em conjunto, uma suprimindo a deficiência da outra. A presença de aterros sanitários se faz necessária mesmo em um sistema de tratamento e recuperação energética eficiente, e se torna ainda mais vantajosa a combinação de outras técnicas de tratamento na gestão dos resíduos.

No entanto, a decisão sobre a melhor forma de combinar essas alternativas de tratamento deve ser baseada em análises de viabilidade técnica e econômica, que contemplem aspectos locais relevantes, como a composição gravimétrica dos resíduos, a cultura e a economia do local, de forma a possibilitar a escolha das técnicas mais favoráveis para cada local.

Ainda assim, não é suficiente que se pense apenas na melhor forma de lidar com o resíduo a partir de sua geração. É importante lembrar, neste momento, que a prioridade na gestão de RSU é a não geração de resíduos, quando possível, ou ao menos a redução desses. A própria Agenda 21, em seu capítulo 21, estabelece que a gestão dos resíduos deve ir além da mera disposição final ou recuperação, buscando atingir a raiz do problema, ao mudar padrões insustentáveis de produção e consumo. A ideia principal, portanto, não é apenas focar em soluções tidas como *end-of-pipe*, “tapando os buracos” do problema, mas sim, focar na redução de resíduos na fonte. A palavra de ordem é mudança, e é urgente sua necessidade na forma como se enxerga o valor real do resíduo, não o tendo mais como *lixo*.

4.3 Recomendações Futuras

A metodologia aplicada neste estudo, e por consequência, os resultados alcançados, limitam-se na medida em que tiveram por base resultados parciais de composição gravimétrica dos RSU de Florianópolis. A Comcap possui em andamento novo estudo de caracterização de resíduos, que irá integrar o próximo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), e poderá fornecer dados que levem a resultados mais interessantes e fiéis à realidade.

Os cálculos realizados tiveram por base apenas os resíduos sólidos domiciliares. Ressalta-se que, caso fossem analisados outros resíduos que possuem elevado potencial energético, como restos de podas, colchões, madeiras e alguns resíduos provenientes da limpeza pública, estes poderiam contribuir ao aumento da energia disponível no RSU total e, conseqüentemente, a um maior potencial energético.

Para estudos futuros, sugere-se a análise de múltiplos cenários, que envolvam diferentes percentuais de reciclagem dos resíduos e cenários variados de gerenciamento, de forma a se obter uma análise mais próxima da realidade. Sugere-se também uma análise nos âmbitos econômicos e sociais, que permitam construir uma visão mais completa acerca da viabilidade de instalação de uma usina de incineração com recuperação energética para o tratamento de RSU no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Compostagem**: NBR 13591. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **Incineração de resíduos sólidos perigosos - Padrões de desempenho**: NBR 11175. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

_____. **Resíduos Sólidos – Classificação**: NBR 10004. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2014**. Brasil, 2015.

AMBIENTE ENERGIA. **BNDES financia projeto que transforma lixo em energia**. 2010. Disponível em: < <http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2010/12/BNDES-finan- cia-projeto-transforma-lixo-em-energia/7795> >. Acesso em: 21/11/2011.

ASSAMOI, B., LAWRYSHYN, Y. The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. **Waste Management**, volume 32, p. 1019–1030, 2012.

ASTRUP, T. F. et al. Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations. **Waste Management**, v. 37, p. 104-115, 2015.

BASSANI, P. D. **Caracterização de Resíduos Sólidos de Coleta Seletiva em Condomínios Residenciais - Estudo de caso em Vitória - ES**. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFES, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Vitória. 2011.

BOLOGNESI, A. **Incineração e aterro sanitário: uma comparação entre duas tecnologias**. In: SANTOS, M. C. L.; DIAS, S. L. F. G. (Org.). **Resíduos sólidos urbanos e seus impactos socioambientais**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2012, 82 p.

BORGNAKKE, C. E.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 7ª Edição Americana, São Paulo, Blucher, 2009. (Série Van Wylen).

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Estabelece a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 2010.

CAIXETA, D. M. **Geração de energia elétrica a partir da incineração de lixo urbano**: o caso de Campo Grande/MS. 2005. 86 f. Monografia de Especialização (Pós-Graduação em Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável) – UnB, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, 2005.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. São Paulo: Humanitas/FFLCH/USP, 1997.

CAMERON MCKENNA LLP : CMS. **Waste Management in Central and Eastern Europe**. 2020 Obligations. Cameron McKenna LLP, Law-Now, 2013.

CEMPRE. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal**: manual de gerenciamento integrado. 3 ed. São Paulo: IPT/CEMPRE. 2010. 350 p.

CEWEP. CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS. **2014 Country Reports on Waste Management**. Disponível em: <http://www.cewep.eu/information/data/subdir/1187._Country_Reports_on_Waste_Management.html>. Acesso em: 16 jun 2014.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. 2003. 477 p.

COMCAP. COMPANHIA DE MELHORAMENTOS DA CAPITAL. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**: Relatório Final. Florianópolis, 2002. 112 p.

_____. **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS. Município de Florianópolis/SC**. Florianópolis, 2011. 261 p.

_____. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Florianópolis: 2013.

_____. **Relatório da Administração**. Demonstrações Contábeis: exercício 2014. Florianópolis, 2015. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/documentos/pdf/14_05_2015_14.52.49.12ad5395b139be6ad6a46954a77b0f78.pdf>. Acesso em: 08 jun 2015

DEFRA. DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT FOOD & RURAL AFFAIRS. **Energy from waste: a guide to the debate**. Ed. Revisada. 2014. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf>. Acesso em : 18 jun 2014.

DIAS, F. P. **A incineração de resíduos sólidos: análise custo benefício do incinerador de resíduos sólidos do P-Sul – DF**. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Economia) -Departamento de Economia, Universidade de Brasília, Brasília. 2006.

DWYER, H., THEMELIS, N.J. Inventory of U.S. 2012 dioxin emissions to atmosphere. **Waste Management**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.009>>. Acesso em: 24 set. 2015.

EEA. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. MILIOS, L. **Municipal waste management in the Netherlands**. ETC/SCP: 2013. 19 p.

ENGEBIO ENGENHARIA S/S LTDA. **Relatório 1: Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica**. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 294 p.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Energy Recovery from Waste**. 2011. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/wte/index.htm>>. Acesso em: 01 out. 2015.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2007.

_____. **Série Recursos Energéticos: Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS.** Rio de Janeiro: EPE, 2008. 73 p.

_____. **Balanco energético nacional 2015: ano base 2014.** Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FADE. FUNDAÇÃO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição final de Resíduos Sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** Relatório Final das Principais Rotas de Destinação de Resíduos Sólidos no Exterior e no Brasil. Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE. 183 p. 2013.

FARRET, F. A. Conversão do lixo em energia: uma questão de ponto de vista. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 10, n. 18, p. 109-126, jan./jun., 1999. Semestral.

FEAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento Energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais.** Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.

GEC. GLOBAL ENVIRONMENT CENTRE FOUNDATION. **Internal Circulation Fluidized Bed Incinerator.** Osaka, 2007. Disponível em: <http://nett21.gec.jp/WATER/data/water_16-5.html>. Acesso em: 10 set. 2015

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=420540&search=santa-catarina|florianopolis>>. Acesso em: 03 jun 2015.

_____. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.

ICES. INICIATIVA CIDADES EMERGENTES E SUSTENTÁVEIS. **Plano de Ação Florianópolis Sustentável.** Florianópolis: 2015. 135 p.

IDRC. INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE. **Manual on municipal solid waste integrated management in Latin American and Caribbean cities.** Tradução do espanhol para o inglês de Liliana Battipede e David Reed. 1. ed. Montevideo: IDRC, 2008. 264 p.

ISAIA, E. B. I. ; ISAIA, T. ; ROTH, B. W. Destinação final dos resíduos sólidos urbanos. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 10, n. 18, p. 25-40, jan./jun., 1999. Semestral.

ISWA. INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **Waste-to-energy: state-of-the-art report statistics 6th edition.** Denmark: Ramboll, 2012.

JACOBI, P. R. **Incineração e aterro sanitário: uma comparação entre duas tecnologias.** In: SANTOS, M. C. L.; DIAS, S. L. F. G. (Org.). Resíduos sólidos urbanos e seus impactos socioambientais. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2012, 82 p.

JESWANI, H. K.; SMITH, R. W.; AZAPAGIC, A. Energy from waste: carbon footprint of incineration and landfill biogas in the UK. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 218-229, 2013.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills.** Washington: The World Bank, 1999. n. 4. 25 p.

KANTER, Z. **TED Conferences, LLC.** 2015. Disponível em : < <http://tedxtalks.ted.com/video/Falling-in-love-with-the-future>>. Acesso em : 28 jun. 2015.

KULKARNI, P. S.; CRESPO, J. G.; AFONSO, C. AM. Dioxins sources and current remediation technologies — a review. **Environment international**, v. 34, n. 1, p. 139-153, 2008.

LEME, M. M. V. **Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso.** 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – UNIFEI, Itajubá. 2010.

LIMA, J.D. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

MAMEDE, M. C. S. **Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MANSOR, M. T. C. et al. **Resíduos sólidos**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente - SMA, 2010. 76 p.

MCDUGALL, F. et al. **Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory**. 2. ed. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2001. 520 p.

MENDES, M. R.; ARAMAKI, T.; HANAKI, K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 1, p. 47-63, 2004.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A.. Estágio atual da incineração no Brasil. **VII Seminário Nacional de resíduos sólidos e limpeza pública**, p. 3-7, 2000.

MESQUITA JÚNIOR, J. M. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Coordenação de Karin Segala. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 39 p.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. **Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na cogeração de energia**. Estudo para a região metropolitana de Goiânia. Universidade Católica de Goiás, Departamento de Engenharia. Goiânia, 2006.

PARO, A. C., COSTA, F. C., COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v.14, n. 2, p. 113-125, 2008.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente**

aplicáveis no Brasil. 2010. 186 p. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, EP/FEA/IEE/IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PINTO, C. P. **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável.** 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1999.

PMF. PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Plano Municipal de Coleta Seletiva.** Relatório Parcial. Florianópolis, 2014. (Documento em elaboração).

POLETTTO, J. A. F. Gestão do resíduo sólido urbano – Incineração: uma alternativa. **RETEC**, Ourinhos, v. 4, n. 1, p. 142-162, jan./jun., 2011.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1718-1724, 2009.

ROBERTS, R. J.; CHEN, M. Waste incineration — how big is the health risk? A quantitative method to allow comparison with other health risks. **Journal of Public Health**, v. 28, n. 3, p. 261-266, 2006.

SANTOS, G. G. D. **Análise e Perspectivas de Alternativas de Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos:** o caso da incineração e da disposição em aterros. 2011. 193 f. Dissertação (Mestrado) - UFRJ - Programa de Planejamento Energético, COPPE, Rio de Janeiro. 2011.

SCLIAR, M. A matéria fora do lugar. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 10, n. 18, p. 11-12, jan./jun., 1999. Semestral.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos.** 2011. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

STEHLIK, P. Contribution to advances in waste-to-energy technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 10, p. 919-931, 2009.

THANH, N. P.; MATSUI, Y. Assessment of potential impacts of municipal solid waste treatment alternatives by using life cycle approach: a case study in Vietnam. **Environmental monitoring and assessment**, v. 185, n. 10, p. 7993-8004, 2013.

TYSKENG, S.; FINNVEDEN, G. Comparing energy use and environmental impacts of recycling and waste incineration. **Journal of environmental engineering**, v. 136, n. 8, p. 744-748, 2010.

USINAVERDE, 2010. Disponível em:
<<http://www.usinaverde.com.br>>. Acesso em: 21 set. 2015

ZANTA, V.M. ; FERREIRA, C. F. A. . Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos urbanos. In: BORGES, A.C., et al. (Org.). **Resíduos Sólidos Urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. 1 ed. São Carlos SP: Rima Artes e Textos, 2003, v. 1, p. 1-18.

APÊNDICE A – Planilha de cálculos

Resíduo	Base Úmida (B.U.)			Base Seca (B.S.)				
	Massa total	fm	Umidade	Massa Total	fm B.U.	fm B.S.	PCI	PCI.fm_seca
	kg	kg/kg	%	kg	kg/kg	kg/kg	kJ/kg	kJ/kg
Orgânico	43.803.139	0,2700	66%	14.893.067	0,092	0,128	18.003	2297,4
Plástico Mole	515.253	0,0031	17%	427.660	0,003	0,004	43.124	154,2
Plástico Duro	1.893.782	0,0116	17%	1.571.839	0,010	0,013	43.124	577,2
Têxteis	9.154.701	0,0559	36%	5.859.009	0,036	0,050	17.585	874,5
Sanitários	20.919.861	0,1277	62%	7.970.467	0,049	0,068	15.910	1076,0
Madeira	291.066	0,0018	25%	218.300	0,001	0,002	15.491	29,1
Borracha	991.411	0,0061	5%	941.840	0,006	0,008	40.612	327,2
Outros	18.804.703	0,5238	0%	18.804.703	0,524	0,728	0	0,0
Total	96.373.916	1	-	50.686.885	0,719	1	-	

Massa RSU_úmido (kg)	Umidade (kg/kg)	Massa RSU_seco (kg)
77.569.213	0,281	55.801.407

Umidade	0,281
Total	1

RSU	5335,6 kJ/kg
------------	---------------------

ANEXO A - Composição detalhada de RSU – Peso por material coletado em Florianópolis (PMF, 2014)

Produto	Sub-produto	Percentual total	Peso (Kg)
Resíduo Orgânico	Poda e Capina	10,55%	17.275.558
	Alimentos	16,19%	26.527.581
Papel		3,14%	5.144.596
Papelão		5,96%	9.759.738
Papel Misto		11,79%	19.311.476
Plásticos Moles	PEAD	1,68%	2.753.578
	PVC	0,98%	1.606.988
	PEBD	11,17%	18.297.606
	PP	0,02%	30.634
	PS	0,00%	5.641
	EPS	0,00%	0
	Plástico Metalizado	0,31%	509.612
Plásticos Duros	PET	3,65%	5.984.834
	PEAD	0,61%	1.005.261
	PVC	0,46%	756.812
	PEBD	0,06%	104.141
	PP	1,63%	2.672.452
	PS	0,47%	766.351
	EPS	0,54%	888.196
	Plástico Metalizado	0,12%	191.061
	Outros	0,03%	48.174
Vidro		4,89%	8.010.383
Tetrapack		1,55%	2.542.816
Metais	Alumínio	0,95%	1.558.034
	Ferro	2,40%	3.932.006
	Outros	0,00%	0
Madeira		0,18%	291.066
Têxteis, Trapo, Couro		5,59%	9.154.701
Tóxicos	Pilhas, Baterias e Lâmpadas	0,06%	95.134
Infectantes		0,56%	917.461
Fraldas e Resíduo sanitário		12,77%	20.919.861
Resíduos da Construção Civil		0,02%	32.918
Borracha		0,61%	991.411
Eletrônicos		0,97%	1.588.825
Outros		0,08%	127.166
Total		100%	163.802.073